

Vergleich relevanter Parameter von Multipixelsensoren für Spurdetektoren nach Bestrahlung mit hohen Proton- und Neutronflüssen

Von der Fakultät für Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktors der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Master of Science

Matthias Bergholz
geboren am 17.08.1981 in Cottbus

Gutachter: Prof. Dr. Wolfgang Lohmann

Gutachter: Prof. Dr. Jürgen Reif

Gutachter: Prof. Dr. Ulrich Husemann

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Februar 2015

Es kommt wie es kommt, mache das Beste daraus!

Für meine Freunde

Kurzdarstellung

Um eine höhere Sensitivität für seltene Physikereignisse zu erzielen, wird die Luminosität am LHC in der dritten Upgrade-Phase um den Faktor fünf gesteigert. Die damit verbundene Steigerung der Wechselwirkungsrate bedingt für den CMS-Spurdetektor strahlungshärtere Sensoren. Um das geeignetste Material zu finden, wurde die HPK-Kampagne gestartet. Ziel der Kampagne ist es, die auf dem Markt verfügbaren Siliziumsubstrate und Prozesstechnologien auf ihre Eignung zu überprüfen.

In der vorliegenden Arbeit wurden aus der HPK-Kampagne die sogenannten MPix-Sensoren untersucht. Dafür wurde zunächst eine Probestation in Betrieb genommen und die Steuerungssoftware programmiert. Zusätzlich wurden neuartige Auswertungsmethoden entwickelt und eine Datenbank eingerichtet.

Zur Untersuchung der Änderung der Sensoreigenschaften durch Bestrahlung wurden die MPix-Sensoren zunächst vor der Bestrahlung charakterisiert und die Ergebnisse anschließend mit den Ergebnissen nach Bestrahlung verglichen. Der Untersuchungsfokus lag auf den Einfluss des Sensorsubstrats, der Produktionstechnologie und der Bias-Strukturen auf der Strahlenhärte.

Durch Bestrahlung degenerierten die Sensortypen unterschiedlich stark. Der Anstieg des Stromes durch Bestrahlung ist kleiner für Sensoren aus Magnetic-Czochralski-Silizium verglichen mit Sensoren aus Float-Zone-Silizium.

Für Sensoren aus Float-Zone-Silizium ist der Stromanstieg schwächer für 200 μm dicke Sensoren verglichen mit 320 μm dicken Sensoren. Bias-Strukturen aus Polysiliziumwiderstand und Punch-Through-Struktur werden durch die Bestrahlung geschädigt. Bei Strukturen aus Polysilizium steigt der Widerstand durch Bestrahlung um etwa 50% und bei der Punch-Through-Struktur steigt die Punch-Through-Spannung um den Faktor zwei.

Abstract

The further increase of the luminosity of the Large Hadron Collider (LHC) at CERN requires new sensors for the tracking detector of the Compact Muon Solenoid (CMS) experiment. These sensors must be more radiation hard and of a finer granularity to lower the occupancy. In addition the new sensor modules must have a lower material budget and have to be self triggering.

Sensor prototypes, the so called “MPix”-sensors, produced on different materials were investigated for their radiation hardness. These sensors were fully characterized before and after irradiation. Of particular interest was the comparison of different bias methods, different materials and the influence of various geometries. The degeneration rate differs for the different sensor materials. The increase of the dark current of Float-Zone-Silicon is stronger for thicker sensors and less than for Magnetic-Czochralski-Silicon sensors.

Both tested bias structures are damaged by the irradiation. The poly silicon resistance increases after irradiation by fifty percent. The Punch-Through-Structure is more effected by irradiation. The punch-through voltage increase by a factor of two. Due to the higher pixel current, the working point of the sensor is shifted to smaller differential resistances.

Inhaltsverzeichnis

0	Einleitung	1
1	Physikalische Fragestellungen am LHC und das CMS-Experiment	3
1.1	Motivation	3
1.1.1	Einleitung	3
1.2	Das Standardmodell	5
1.2.1	Teilchen des Standardmodells	5
1.2.2	Kurzeinführung der zugrundeliegenden Theorien	6
1.3	Physikalische Zielstellungen des LHCs	10
1.3.1	Das Higgs-Boson	10
1.3.2	Supersymmetrie	10
1.4	Die Experimente am LHC	13
1.4.1	Der LHC Beschleuniger	13
1.4.2	Die Experimente	13
1.4.3	Compact Muon Solenoid	14
2	Halbleiter, Silizium und Siliziumsensoren	19
2.1	Motivation	19
2.2	Halbleiter	19
2.3	Physikalische Eigenschaften von Silizium	26
2.3.1	Strahlungsschäden bei Silizium	31
2.4	Siliziumsensoren	37
2.4.1	Grundlegende Funktionsweise	37
2.4.2	Herstellung von Siliziumwafern	39
2.4.3	Vom Wafer zum Sensor	42
2.4.4	Sensoraufbau	42
2.4.5	Sensorengrößen und ihre Bedeutung für den Sensorbetrieb	46
3	Die HPK-Kampagne	49
3.1	Zukünftige Sensoren für den CMS-Spurdetektor	49
3.1.1	Erwartete Strahlendosis	49
3.1.2	Kampagnenverlauf	49
3.1.3	Waferlayout und Teststrukturen	51

3.1.4	Multi-geometry Pixelsensoren	51
3.2	Zusammenfassung bisheriger Ergebnisse anderer Arbeitsgruppen .	56
3.2.1	Dioden- und Teststrukturmessungen	56
3.2.2	Sensormessungen	56
4	Messaufbau und Softwarepakete	57
4.1	Der Messplatz	57
4.1.1	Messgeräte und Spannungsversorgungen	58
4.2	Messaufbau und Messeinstellungen	61
4.2.1	Abhängigkeit des Dunkelstromes des <i>Biasrings</i> von der Spannung	61
4.2.2	Abhängigkeit der <i>Biasring</i> -Kapazität von der Spannung .	63
4.2.3	Abhängigkeit des Pixeldunkelstromes von der Spannung .	65
4.2.4	Abhängigkeit der Pixelkapazität von der Spannung	67
4.2.5	Messung des Zwischenpixelwiderstandes	67
4.2.6	Messung der Zwischenpixelkapazität	68
4.2.7	Messung der <i>Bias-Strukturen</i>	68
4.2.8	Messaufbauten für nicht Standardmessungen	70
4.3	Die Messsoftware	72
4.4	Die Auswertungsprogramme	74
4.4.1	Datenanalyseprogramm	74
4.4.2	Datenausleseprogramm	74
5	Messergebnisse für MPix-Sensoren	75
5.1	Allgemeine Hinweise zur Darstellung	75
5.2	Abhängigkeit des Dunkelstromes des <i>Biasrings</i> von der Spannung	77
5.2.1	Ergebnisse für unbestrahlte Sensoren	77
5.2.2	Ergebnisse für bestrahlte Sensoren	80
5.3	Abhängigkeit der Biasring-Kapazität von der Spannung	83
5.3.1	Ergebnisse für unbestrahlte Sensoren	83
5.3.2	Ergebnisse für bestrahlte Sensoren	85
5.4	Abhängigkeit des Dunkelstromes der Pixel als Funktion der Spannung	87
5.4.1	Ergebnisse für unbestrahlte Sensoren	87
5.4.2	Ergebnisse für bestrahlte Sensoren	89
5.4.3	Einfluss der Messmethode	90
5.5	Abhängigkeit des Pixelkapazität von der Spannung	92
5.5.1	Ergebnisse für unbestrahlte Sensoren	92
5.5.2	Ergebnisse für bestrahlte Sensoren	93
5.5.3	Einfluss der Messmethode	94
5.6	Vergleich der Ergebnisse der <i>Biasring</i> - und Pixelmessungen . . .	95
5.6.1	Temperaturabhängigkeit	95
5.6.2	Strom-Messungen	95
5.6.3	Kapazitätsmessungen	97
5.7	Messung des Zwischenpixelwiderstandes	99

5.7.1	Ergebnisse für unbestrahlte Sensoren	99
5.7.2	Ergebnisse für bestrahlte Sensoren	99
5.8	Messung der Zwischenpixelkapazität in Abhängigkeit von der Spannung	103
5.8.1	Ergebnisse für unbestrahlte Sensoren	103
5.8.2	Ergebnisse für bestrahlte Sensoren	104
5.8.3	Untersuchungen zum Messverfahren	105
5.9	Messung des Polysiliziumwiderstandes	107
5.9.1	Ergebnisse für unbestrahlte Sensoren	107
5.9.2	Ergebnisse für bestrahlte Sensoren	109
5.9.3	Einfluss der Messmethode	109
5.10	Messung der <i>Punch-Through-Struktur</i>	112
5.10.1	Ergebnisse für unbestrahlte Sensoren	112
5.10.2	Ergebnisse für bestrahlte Sensoren	114
5.10.3	Einfluss der Messmethode	118
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	121
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	122
6.1.1	Dunkelströme	122
6.1.2	Kapazitäten zur Sensorrückseite	122
6.1.3	Zwischenpixeleigenschaften	122
6.1.4	<i>Bias-Strukturen</i>	122
6.2	Schlußfolgerungen und Ausblick	123
	Abbildungsverzeichnis	125
	Tabellenverzeichnis	129
	Literaturverzeichnis	131
A	Handbuch der Messsoftware	145
A.1	Introduction	146
A.1.1	Special remarks about the layout	146
A.1.2	Change Defaults	146
A.2	Start a measurement	147
A.3	Setting Screen	147
A.3.1	Set the Voltage Ramping (<i>upper left corner</i>)	147
A.3.2	Set the Frequencies for the LCR Meter (<i>upper left center</i>)	149
A.3.3	The Inputs for the Database (<i>lower left center</i>)	149
A.3.4	Input Errors (<i>bottom left</i>)	150
A.3.5	Measurement Selection (<i>upper center</i>)	151
A.3.6	Chuck Temperature (<i>lower center</i>)	151
A.3.7	Chuck Movement (<i>bottom center</i>)	151
A.3.8	Save and Load Measurement Settings (<i>right side, top</i>)	153

A.3.9	Select a Constant Bias Voltage (<i>right side, top middle</i>) . . .	153
A.3.10	Passes (<i>right side, central middle</i>)	153
A.3.11	Select the Voltage Source (<i>right side, lower middle</i>)	154
A.3.12	Select the Measurement Device (<i>right side, bottom</i>)	154
A.4	Measurement Screen	155
A.4.1	What Happens during a Measurement?	155
A.5	Expert Screen	158
A.5.1	Device, Source and Matrix Settings (<i>left top</i>)	158
A.5.2	Files Options (<i>left middle</i>)	160
A.5.3	Humility Sensor activation (<i>left bottom</i>)	163
A.5.4	Matrix Activation (<i>left bottom</i>)	163
A.5.5	End program immediately (<i>left bottom</i>)	163
A.5.6	Safety (<i>top center</i>)	163
A.5.7	General Settings (<i>center middle</i>)	163
A.5.8	Data analysis (<i>center bottom</i>)	164
A.5.9	Other Fields (<i>right side</i>)	166
A.6	Comments for Programmer	167
A.6.1	Requirements to use this Program	167
A.6.2	Overview of the Internal Code Structure	167
A.6.3	List of Sub-Vi	168
A.7	Remarks	171
A.7.1	Final Comments	171
A.7.2	List of Known Errors or Bugs	171
A.7.3	List of changes start from 2.16	171
A.7.4	Acknowledgment	171
B	Handbuch der Datenanalysesoftware	173
B.1	Introduction	174
B.1.1	General Remarks	174
B.2	Create Headers	176
B.3	Change Header	177
B.4	Data Analysis	178
C	Handbuch der Datenauslesesoftware	183
C.1	Introduction	184
C.1.1	Program Flow	184
C.2	Selection options	187
C.3	Readout options	188
D	Manual Data Base	189
D.1	databases	189
D.1.1	Short introduction of MYSQL	189
D.1.2	Short introduction off the Catalyst-Framework	190
D.1.3	User interface	192

D.2	Description of the database tables	194
E	Zusätzliche Tabellen und Abbildungen	201
F	Sonstige Anhänge	211
F.1	Danksagungen	212
F.2	Kurzlebenslauf	213
F.3	Liste ausgewählter Veröffentlichungen	214
	F.3.1 Schriftliche Veröffentlichungen	214
	F.3.2 Konferenzbeiträge	215
F.4	Eidesstattliche Erklärung	216

Abkürzungsverzeichnis

BR *Biasring*

CMS Compact Muon Solenoid

Epi Epitaktisches Silizium

FZ Float-Zone-Silizium

IP Wechselwirkungspunkt

LBM Leitungsbandminimum

LHC Large Hadron Collider

MCz Magnetic-Czochralski-Silizium

MIP Minimum Ionizing Particle

MPix Multi-geometry Pixelsensor

PS Polysiliziumwiderstand

PT *Punch-Through-Struktur*

SM Standardmodell

VB Valenzbandmaximum

WW Wechselwirkung

Kapitel 0

Einleitung

Zur Erhöhung der Wechselwirkungsrate, und den damit verbundenen, besseren Untersuchungsmöglichkeiten von Wechselwirkungen mit sehr kleinen Wechselwirkungsquerschnitten, wird die Luminosität des Large Hadron Colliders am CERN in der dritten Upgrade-Phase um den Faktor fünf gesteigert. Die Steigerung der Wechselwirkungsrate bedingt einen Neubau des CMS-Spurdetektors. Dieser muss, um dem höheren Teilchenfluss gerecht zu werden und weiterhin alle Teilchenspuren auflösen zu können, feiner strukturiert sein. Zusätzlich müssen, um die angestrebte Nutzungsdauer von 10 Jahren zu erreichen, auch die Sensoren strahlungshärter, als die derzeitig verwendeten, sein. Daher wird der gesamte Spurdetektor mit dem Upgrade ausgetauscht.

Zur Suche nach dem am besten geeignetsten Sensormaterial wurde die „HPK-Kampagne“ gestartet. In dieser Kampagne werden die derzeitig auf dem Markt verfügbaren Siliziumsubstrate und Prozesstechnologien auf ihre Eignung überprüft. In der vorliegenden Arbeit wurde aus der HPK-Kampagne der Multi-geometry Pixelsensor (MPix) untersucht.

Eine Randbedingung bei dem Bau des zukünftigen Spurdetektors ist, dass die Ausgangsdatenmenge des Level-1-Triggers nicht die Kapazitätsgrenze der nächsten Trigger-Stufe übersteigen darf [54, 139]. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen zukünftig auch Informationen des Spurdetektors in die Entscheidungen des Level-1-Triggers einfließen. Eine Möglichkeit, dieses zu realisieren, ist ein selbsttriggerndes Modul für grosse transversale Teilchenimpulse zu verwenden. Für dieses Modul ist der MPix-Sensor ein Prototyp um verschiedene Sensorgeometrien zu untersuchen. Um die Messungen durchführen zu können, musste eine Probestation in Betrieb genommen und die benötigte Steuerungssoftware programmiert werden. Zusätzlich wurden neuartige Auswertungsmethoden entwickelt, eine Datenbank eingerichtet und diese in ein automatisiertes Auswertungssystem integriert. Für die Datenbank wurde zusätzlich ein HTML- und ein LabVIEW-Interface zur schnellen und zielgerichteten Ergebnissuche erstellt.

Zur Untersuchung der Änderung der Sensoreigenschaften durch Bestrahlung wurden die MPix-Sensoren zunächst vor der Bestrahlung mittels Strom-Spannungs- und Kapazität-Spannungs-Messungen charakterisiert und die Ergebnisse mit denen nach Bestrahlung verglichen. Untersucht wurde die Abhängigkeit des Dunkelstromes von der Spannung, die Pixelkapazität zur Sensorrückseite in Abhängigkeit der Spannung, die Zwischenpixelkapazität und der Zwischenpixelwiderstand. Der Hauptfokus der Untersuchungen lag auf dem Einfluss der *Bias-Strukturen* und dem Einfluss der Produktionstechnologie bzw. des Sensorsubstrates auf die Strahlenhärte. Insbesondere wurde die, für die HPK-Kampagne einzigartige, *Punch-Through-Struktur* untersucht. Dabei wurde eine deutliche Änderung der Eigenschaften durch Bestrahlung gemessen, die auf signifikante Strahlenschäden hinweisen. In Kapitel 1 werden die zu erforschenden physikalischen Hintergründe des Physikprogramms des LHC eingeführt und der Aufbau des CMS-Experimentes beschrieben. In Kapitel 2 werden der Aufbau und die Eigenschaften von Siliziumsensoren diskutiert. Im Kapitel 3 wird die HPK-Kampagne vorgestellt und in Kapitel 4 die Messaufbauten beschrieben. Die Messergebnisse werden in Kapitel 5 zusammengefasst und in Kapitel 6 die Schlussfolgerungen gezogen.

Kapitel 1

Physikalische Fragestellungen am LHC und das CMS-Experiment

1.1 Motivation

Die vorliegende Arbeit beinhaltet die Forschungsergebnisse für ein geplantes Upgrade des CMS-Experimentes am LHC. Daher werden in diesem Kapitel der LHC eingeführt, mit dem Standardmodell der Teilchenphysik die Basistheorie der Teilchenphysik zusammengefasst, die zukünftig am LHC zu beantwortenden Fragestellungen gestellt und der derzeitige Aufbau des CMS-Experimentes beschrieben.

1.1.1 Einleitung

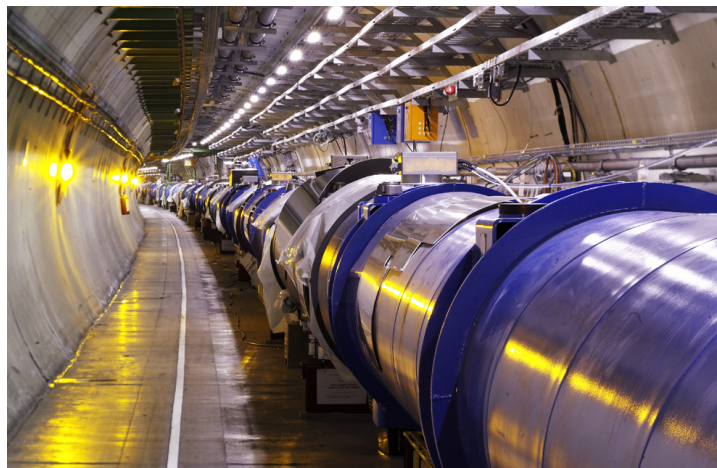


Abbildung 1.1: **Blick in den LHC-Beschleunigertunnel;**
Quelle: CERN-Pressfoto

Der **LHC** am CERN ist der derzeit leistungsstärkste Ringbeschleuniger der Welt, ein Blick in den Beschleunigertunnel ist in der Abbildung 1.1 gezeigt. Mit ihm können gegenläufig Protonen auf eine Maximalenergie von 7 TeV beschleunigt und an den Wechselwirkungspunkten zur Kollision gebracht werden.

Nach dem Beginn der Messungen im Jahr 2010 konnte das Standardmodell der Teilchenphysik bei einer Schwerpunktsenergie von 2,76 TeV bestätigt werden.

Im Jahr 2011 wurde die, auf Seite 13 eingeführte, Luminosität gesteigert und die Schwerpunktsenergie auf 7 TeV erhöht. Der LHC lieferte stabile Strahlen und das, in Kapitel 1.4.3 beschriebene, CMS-Experiment zeichnete eine Datenmenge von einer integrierten Luminosität von $5,6 \text{ fb}^{-1}$ für Proton-Proton-Kollisionen auf. Eines der Ergebnisse ist das gemessene Zwei-Myonen-Massenspektrum in Abbildung 1.2. Alle bekannten Teilchen, die in zwei Myonen zerfallen, sind im Spektrum klar zu erkennen. Nach einem planmäßigen technischen Stopp begannen im Frühjahr 2012 die Messungen bei einer Schwerpunktsenergie von 8 TeV. Bis Ende 2012 wurden Daten über eine Gesamtluminosität von $21,8 \text{ fb}^{-1}$ aufgezeichnet. Einige der herausragenden Ergebnisse sind [52]¹:

- **Die Entdeckung des „Higgs-Bosons“ bei einer Masse von etwa 125 GeV.**
Die bisher gemessenen Eigenschaften stimmen mit den Erwartungen für ein (Standardmodell)-Higgs-Boson überein. Die Auswertung weiterer Daten ist nötig, um das Teilchen eindeutig zu identifizieren.
- Genaueste Messung der Masse des Top-Quarks m_t
 - $m_t = 173,3 \pm 3,7 \text{ GeV}$
- Genaueste Messung des Verhältnisses R der Wirkungsquerschnitte für die Erzeugung der Vektorbosonen W^\pm und Z
 - $R = 10,54 \pm 0,31$, *Theorie: 10,74*

¹Stand: Juli 2013; Eine aktualisierte Liste befindet sich unter:
<http://cms.web.cern.ch/org/cms-papers-and-results>

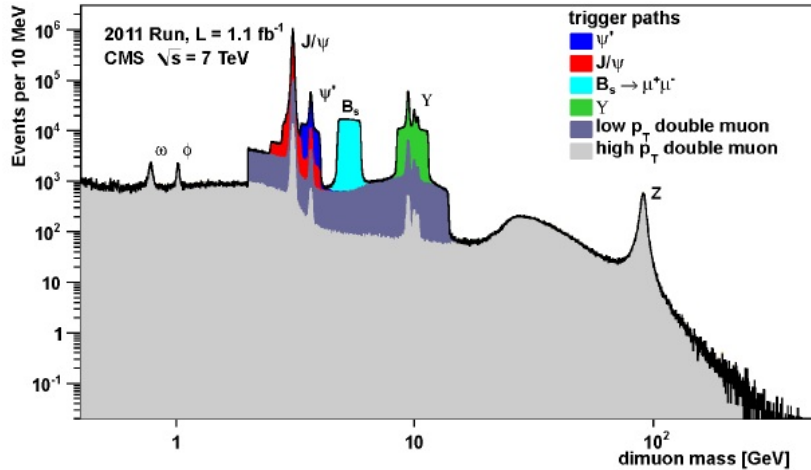


Abbildung 1.2: **Gemessenes Spektrum der invarianten Masse zweier Myonen** bei einer Schwerpunktsenergie von 7 TeV. Die ω -, ϕ -, J/ψ - und Y -Mesonen und das Z -Boson sind als Breit-Wigner-Verteilung zu erkennen.

Quelle: CMS-B-Mesonen Gruppe

1.2 Das Standardmodell

Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt das derzeit experimentell gesicherte Verständnis der Teilchenphysik und ist die Vereinigung mehrerer Theorien [19, 23, 128]. Dieses sind die Elektroschwache Theorie, die die Wechselwirkung der Leptonen und Quarks mit dem Photon und den schweren Eichbosonen W^\pm und Z beschreibt, und die Quantenfarbdynamik, die die Wechselwirkung der farbgeladenen Quarks mit den Gluonen beschreibt.

1.2.1 Teilchen des Standardmodells

Das Standardmodell unterscheidet zwischen den **Fermionen**, die einen halbzahligen Spin haben, und deren Energieverteilung mit der Fermi-Dirac-Statistik beschrieben werden kann, und den **Bosonen**, die einen ganzzahligen Spin besitzen, und deren Energieverteilung der Bose-Einstein-Statistik unterliegt. Zu jedem Teilchen gibt es ein Antiteilchen mit entgegengesetzten, additiven Quantenzahlen wie z.B. der Ladung.

Die Bosonen sind die Austauschteilchen der Wechselwirkungen. Die Fermionen des Standardmodells sind die **Leptonen**, die nur der elektroschwachen Wechselwirkung unterliegen, und die **Quarks**, die zusätzlich stark wechselwirken.

Die Leptonen (Elektron, Myon und Tauon) sind mit ihren zugehörigen Neutrinos in drei **Familien** (ν_e), (ν_μ) und (ν_τ) unterteilt. Die sechs Quarks (Up, Down, Strange, Charm, Bottom und Top), genannt **Flavour**, lassen sich ebenfalls in drei Familien (u), (c) und (t) unterteilen.

KAPITEL 1. PHYSIKALISCHE FRAGESTELLUNGEN AM LHC UND DAS CMS-EXPERIMENT

Eine grafische Darstellung der Ladung, Masse und Lebensdauer der Standardmodellfermionen ist in Abbildung 1.3 gezeigt.

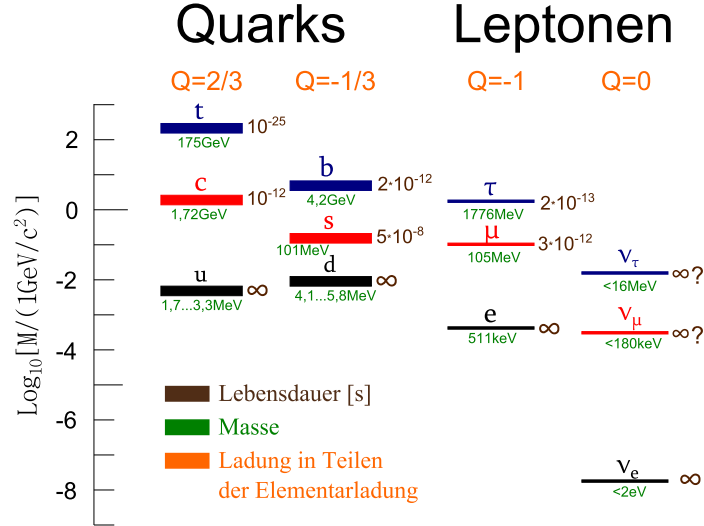


Abbildung 1.3: **Schematische Darstellung der Teilchen des Standardmodells.** Abgebildet ist neben der Massenhierarchie auch die Lebensdauer und die Ladung der Teilchen; Frei nach [128, Figure 1]

1.2.2 Kurzeinführung der zugrundeliegenden Theorien

Quantenelektrodynamik

Die Quantenelektrodynamik (QED) ist die relativistische Quantenfeldtheorie der Elektrodynamik. Ihre in Gleichung 1.1 beschriebene Lagrangedichtefunktion hat zwei Terme, die die freien Leptonen und Photonen beschreiben, sowie einen Wechselwirkungsterm [73].

$\Psi(x)$ ist der **Bispinor**, der relativistische Fermionen beschreibt und $\overline{\Psi}(x)$ ist der adjungierte Bispinor $\overline{\Psi}(x) = \gamma_0 \Psi(x)$. Der Wechselwirkungsterm verknüpft die Bispinoren mit dem elektromagnetischen Viererpotential A_μ und beschreibt die Wechselwirkung zwischen den Leptonen und Photonen.

Die Lagrangedichtefunktion ist invariant unter U(1)-Transformation, eine Eigenschaft die auch **Eichinvarianz** genannt wird.

$$\mathcal{L} = \sum_n \left(\overline{\Psi}_n(x) \left(\underbrace{(i\gamma^\mu \partial_\mu - m_n)}_{L_l} + \underbrace{ie\gamma^\mu A_\mu}_{L_{l\gamma}} \right) \Psi_n(x) \right) - \underbrace{\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}}_{L_\gamma} \quad (1.1)$$

L_l	Dirac-Lagrangedichte	Freie Leptonen
$L_{l\gamma}$	Kopplungsterm	Wechselwirkung zw. Leptonen & Photonen
L_γ	Maxwell-Lagrangedichte	Freie Photonen

Elektroschwache Theorie

Um flavourverändernde Prozesse zu beschreiben, wurde die schwache Wechselwirkung eingeführt [74]. Diese vereinigt die schwache Wechselwirkung mit der QED zur **elektroschwachen Theorie**.

Die Grundfelder dieser Theorie sind die Vektorfelder \vec{W} und \vec{B} . Analog zum Spin wird ein **schwacher Isospin T** eingeführt. Das \vec{W} -Feld hat „T=1“ und besteht aus drei Feldern, die sich in der dritten Komponente T_3 unterscheiden. Drehungen im Isospinraum sind $SU(2)$ -Transformationen. Die Lagrangedichtefunktion ist invariant unter $SU(2)_L$ -Transformation. Die Pauli-Matrixen sind die Erzeugenden der $SU(2)_L$.

Als Erzeugende der $U(1)_L$ -Symmetriegruppe wird zusätzlich die **schwache Hyperladung** Y_W eingeführt. Das damit assoziierte \vec{B} -Feld und die dritte Komponente des \vec{W} -Feldes erzeugen durch eine Drehung um den **elektroschwachen Mischungswinkel** Θ_W das Photon- und das Z-Feld. Die beiden anderen Komponenten des \vec{W} -Feldes erzeugen das W^+ - und das W^- -Boson.

Fermionen wechselwirken mit der Kopplung g an das \vec{W} -Feld und der Kopplung g' an das \vec{B} -Feld [19, 23]. Die **schwache Ladung** g ist mit der Elementarladung e über den elektroschwachen Mischungswinkel verbunden $e = g \cdot \sin(\Theta_W)$. Für die elektrische Ladung Q eines Teilchens gilt $Q = 1/2 \cdot (2 \cdot T_3 + Y_W)$.

Wechselwirkungen mit W-Bosen, „*charged current*“, koppeln nur an linkshändige Fermionen und rechtshändige Antifermionen, wobei Neutrinos immer linkshändig sind. Durch dieses Kopplungsverhalten wird die Parität verletzt. Die durch das Z-Boson und das Photon vermittelten neutralen Ströme koppeln beidhändig.

Die Quarkzustände der schwachen Wechselwirkung sind nicht identisch mit den Eigenzuständen der starken Wechselwirkung. Die Transformation zwischen beiden Zuständen wird durch die, in Formel 1.2 angegebene, **Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-(CKM)-Matrix** beschrieben.

Die Matricelemente werden von der Theorie nicht vorhergesagt und werden in Experimenten gemessen.

$$\begin{pmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} = 0,9743 & V_{us} = 0,2253 & V_{ub} = 0,0035 \\ V_{cd} = 0,2252 & V_{cs} = 0,9735 & V_{cb} = 0,0410 \\ V_{td} = 0,0086 & V_{ts} = 0,0403 & V_{tb} = 0,9992 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

Der Higgs-Mechanismus Die Eichinvarianz gilt nur für masselose Bosonen. Eine Möglichkeit, die Masse der schweren Eichbosonen zu erklären ohne die Eichsymmetrie zu verletzen, ist der von Peter Higgs, François Englert und Robert Brout veröffentlichte „Higgs-Mechanismus“ [51, 78, 103, 104].

KAPITEL 1. PHYSIKALISCHE FRAGESTELLUNGEN AM LHC UND DAS CMS-EXPERIMENT

Es wird ein skalares Eichfeld Φ mit einem Vakuumerwartungswert ungleich Null postuliert. Durch Wechselwirkung mit diesem Feld generieren die Teilchen Masse. Das Potential dieses Feldes ist in Abbildung 1.4 veranschaulicht, die mathematische Formulierung ist in Gleichung 1.3 gegeben. λ ist der Selbstkopplungsterm und der Vakuumerwartungswert v ist $\sqrt{\mu^2/2\lambda}$.

$$\mathcal{L}_{Higgs} = \underbrace{(D_\mu \Phi(x))^* (D^\mu \Phi(x))}_{\text{Lagrange-Dichte}} - \underbrace{\frac{1}{2}\mu^2 \Phi^* \Phi + \frac{1}{4}\lambda (\Phi^* \Phi)^2}_{\text{Potential}} \quad (1.3)$$

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_1 + i \cdot \phi_2 \\ \phi_3 + i \cdot \phi_4 \end{pmatrix}$$

Von **spontaner Symmetriebrechung** spricht man, wenn die Lagrangedichte eichinvariant unter der Symmetrietransformation ist, der Grundzustand aber nicht [82]. Wird das Higgs-Feld um den Vakuumerwartungswert entwickelt

$$\Phi = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\sqrt{\mu^2/\lambda} + \phi(x) \right) \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

bekommt man aus der Lagrangedichthe Gleichung 1.3 die Massenterme der Bosonen:

- $M_\gamma = 0$
- $M_W = v \cdot g$
- $M_Z = \frac{1}{2} v \cdot \sqrt{g^2 + g'^2}$
- $M_{Higgs-Boson} = \sqrt{2} \cdot v$

Die Masse der Fermionen M_f ergibt sich durch das Hinzufügen eines zusätzlichen eichinvarianten Yukawa-Terms

$$M_f = \frac{1}{\sqrt{2}} c_f \cdot v \quad (1.5)$$

wobei die Kopplung c_f für jedes Fermion experimentell bestimmt werden muss.

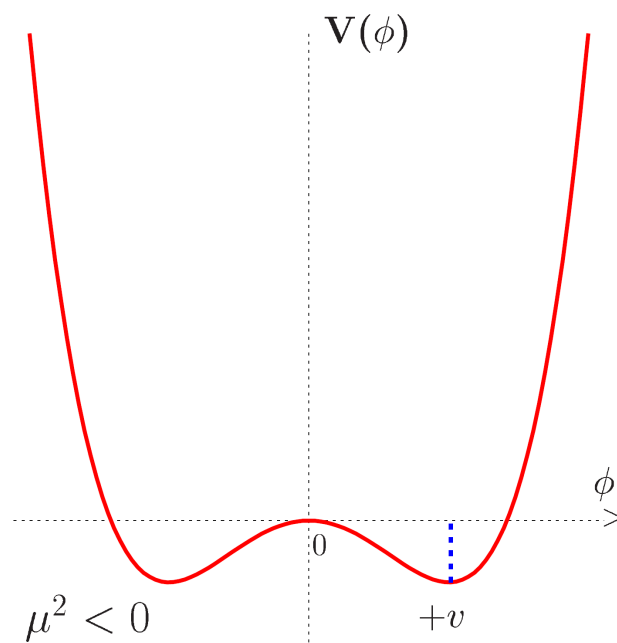


Abbildung 1.4: Verlauf des skalaren „Higgs-Potentials“ in Abhängigkeit des Higgs-Feldes Φ ; [51, Figure1.1]

1.3 Physikalische Zielstellungen des LHCs

Im Standardmodell war bis 2012 das Higgs-Boson das letzte, nicht nachgewiesene, Teilchen. Dessen Suche stand daher an erster Stelle bei der Entwicklung des LHCs und seiner Experimente.

Am LHC wird ein neuer Energiebereich für die Experimente zugänglich. Höhere Energien erlauben kleinere Strukturen zu erforschen. Wir hoffen daher, auf völlig neue Formen der Materie zu stoßen, wie sie z.B. in den frühen Phasen der Entwicklung des Universums existiert haben könnten und deren theoretische Beschreibung z.B. durch die Supersymmetrie geschehen könnte.

1.3.1 Das Higgs-Boson

Das Higgs-Boson ist die resonante Anregung des Higgs-Feldes. Abbildung 1.5 zeigt Streuprozesse, die am LHC zur Erzeugung von Higgs-Bosonen beitragen.

Nach der Erzeugung zerfällt das Higgs-Boson aufgrund seiner geringen Lebensdauer nahe am Wechselwirkungspunkt. Der Anteil möglicher Zerfallskanäle ist in Abbildung 1.6 als Funktion der Masse des Higgs-Bosons gezeigt.

Für eine Masse von 125 GeV zerfällt das Higgs-Boson hauptsächlich in zwei b-Quarks ($b\bar{b}$) oder zwei entgegengesetzt geladene W-Bosonen. Der $b\bar{b}$ -Kanal ist aufgrund des enormen Untergrundes experimentell nur schwer nachzuweisen. Die Messung der Masse im W-Kanal ist wegen des ebenfalls vorhandenen Untergrundes (z.B. $ud \rightarrow W^+ \rightarrow l + \nu$) und der schlechteren Massenrekonstruktion aufgrund nicht detektierter Neutrinos ebenfalls experimentell herausfordernd.

Experimentell einfacher ist der Zugang über den sogenannten **Goldenen Kanal**, in dem das Higgs-Boson in zwei Z-Bosonen zerfällt, die wiederum in je ein Leptonenpaar zerfallen ($H \rightarrow ZZ \rightarrow ll$). Trotz seiner geringen Wahrscheinlichkeit ist der Zerfall in zwei Photonen ebenfalls ein wichtiger Nachweiskanal.

Stand der Higgs-Boson-Suche Am 04.07.2012 konnten das ATLAS- und das CMS-Experiment die Entdeckung eines neuen Teilchens verkünden. Ob es sich dabei um das vorhergesagte Standardmodell-Higgs-Boson handelt, muss durch weitere Messungen überprüft werden². Alle bisherigen Messungen der Anteile der Zerfallskanäle stimmen mit den Vorhersagen für das Standardmodell-Higgs-Boson überein, schließen aber auch andere Modelle nicht aus.

1.3.2 Supersymmetrie

Ergebnisse aus astronomischen Beobachtungen lassen darauf schließen, dass die Materie des Standardmodells nur etwa 5% der Gesamtmasse in unserem Universum bildet [149]. Die restliche Masse ist in etwa 25% dunkle Materie und 70% dunkle Energie aufgeteilt. Um die dunkle Materie erklären zu können, ist eine Erweiterung des Standardmodells nötig.

²Stand 30.06.2013

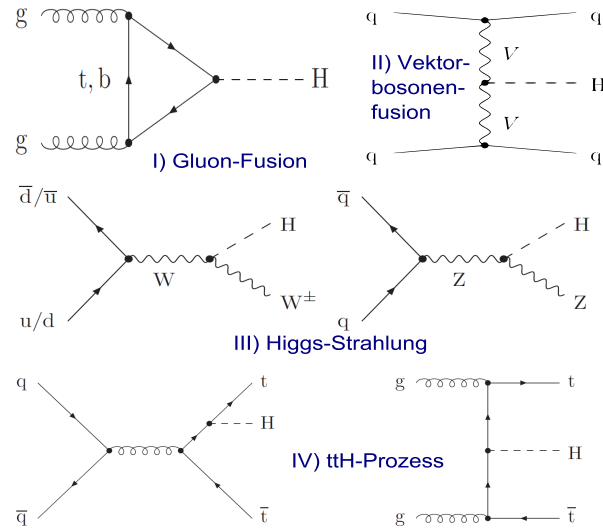


Abbildung 1.5: Die Erzeugungsmodi des Higgs-Bosons am LHC: a) Gluonenfusion, b) Vektrobosonenfusion c) Higgs-Strahlung d) ttH-Prozess; [103, Fig. 1, 4, 7 12]

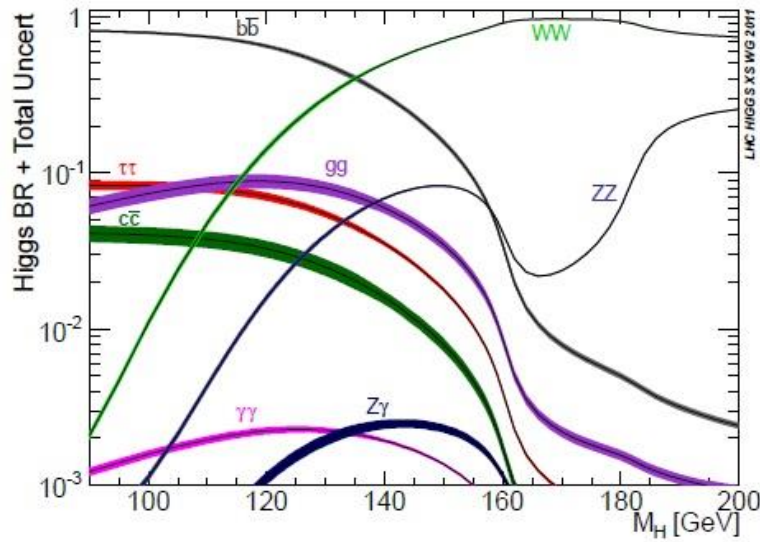


Abbildung 1.6: Die Zerfallskanäle des Standardmodell-Higgs-Bosons in Abhängigkeit der Masse; [104, Fig. 2]

KAPITEL 1. PHYSIKALISCHE FRAGESTELLUNGEN AM LHC UND DAS CMS-EXPERIMENT

Ein möglicher Ansatz ist die Supersymmetrie (SUSY), bei der jedem Standardmodellteilchen ein um $1/2$ spinverschobener Partner zugeordnet ist [115]. Das leichteste dieser supersymmetrischen Teilchen ist ein geeigneter Kandidat für die dunkle Materie. Die erwartete Masse dieses Teilchens liegt bei einigen 100 GeV und somit im Energiebereich des LHCs. Bisher konnte kein supersymmetrisches Teilchen nachgewiesen werden [52].

1.4 Die Experimente am LHC

1.4.1 Der LHC Beschleuniger

Der LHC ist ein Ringbeschleuniger für die Beschleunigung und Speicherung von Protonen- und Schwerionen [26]. Die Protonen werden durch die Ionisation von Wasserstoff erzeugt und über mehrere Stufen auf 450 GeV beschleunigt, bevor sie in den Hauptbeschleuniger geleitet werden.

Für den zweiten Betriebsmodus werden Bleiatome (Pb-208) bei 500 °C verdampft und nach mehreren Beschleunigungs- und Ionisationsschritten bei einer Energie von 5,9 GeV pro Nukleon in den Hauptbeschleuniger transferiert [32].

Nach dem Einspeisen der Protonen- bzw. Ionenpakete in den LHC werden diese auf ihre Kollisionsenergie beschleunigt. Dafür werden, für die zwei gegenläufigen Strahlen, je zwei Beschleunigermodule mit je vier Kavitäten verwendet [27].

Zur Aufrechterhaltung der Ringbahn dienen 1232 Dipolmagnete mit einer Feldstärke von 8,33 T. Das magnetische Feld der Dipole wirkt auf beide Strahlen mit gegengesetzter Feldrichtung. Zusätzlich gibt es 392 Quadrupol-, 688 Sextupol- und 168 Octupolmagnete zur Strahlfokussierung.

Luminosität

Die Luminosität gibt an, wieviele potentielle Wechselwirkungskandidaten es pro Sekunde und Fläche gibt und hat die Einheit $[cm^{-2}s^{-1}]$. Die über die Zeit integrierte Luminosität wird in inversen, Barn $1b = 10^{-28}m^2$, angegeben. Die Luminosität ist das Produkt aus der Teilchenpaketanzahl n_b , der Teilchen pro Paket N_i und der Umlauffrequenz f geteilt durch die effektive Wechselwirkungsfläche A ,

$$L := \frac{n_b \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot f}{A} . \quad (1.6)$$

Die **Ereignisrate** $\dot{N} = \sigma \cdot L$ ist das Produkt aus Luminosität und dem **Wechselwirkungsquerschnitt** σ .

1.4.2 Die Experimente

Am LHC existieren vier Hauptexperimente (ALICE, ATLAS, CMS und LHCb), von denen in dieser Arbeit nur das CMS-Experiment beschrieben wird.

Allgemeine Überlegungen

Da die Lebensdauer der erwarteten neuen Teilchen sehr kurz ist, ist ein direkter Nachweis nicht möglich. Allerdings sind für diese Teilchen die möglichen Zerfallsprozesse und ihre Zerfallsprodukte³ bekannt.

³Leptonen, Photonen, Quarks und Neutrinos. Die Quarks bilden aufgrund des Confinements hadronische Schauer „JETS“.

Name	Messung von	Nachweis von
Spurdetektor	Ladung und Impuls	Geladenen Teilchen
ECAL	Energie	Elektronen, Positronen und Photonen
HCAL	Energie	Hadronen
Myonkammer	Ladung und Impuls	Myonen

Tabelle 1.1: **Die CMS-Unterdetektoren und ihre Funktionen**

Gelingt es, von allen Zerfallsprodukten den Impuls, die Energie und die Ladung zu messen, ist eine genaue Rekonstruktion des Prozesses möglich. Das Zusammenwirken der einzelnen Detektorelemente ist in Tabelle 1.1 für den CMS-Detektor aufgeführt und in Abbildung 1.7 veranschaulicht.

Koordinatensystem Die Position innerhalb eines Detektors wird als Abstand vom Wechselwirkungspunkt angegeben. Die z-Richtung wird durch die Strahlrichtung definiert. Die Teilchenimpulse werden in einen **transversalen Impuls**,

$$p_T := \sqrt{p_x^2 + p_y^2}, \quad (1.7)$$

und eine longitudinale Komponente p_z zerlegt. Die **Rapidität** $y := \tanh(p_z/E)$ ist lorentzinvariant und kann für relativistische Teilchen durch die **Pseudorapidität** η vereinfacht werden, die nur von dem Polarwinkel Θ , aber nicht vom Impulsbetrag, der Masse oder der Energie E abhängt [82].

$$\eta := -\ln \tan\left(\frac{\Theta}{2}\right) \quad (1.8)$$

1.4.3 Compact Muon Solenoid

Das CMS ist ein Universaldetektor bestehend aus dem Spurdetektor, den Kalorimetern, den supraleitenden Magneten und den Myonkammern. Ein Sektor des Detektors senkrecht zur Strahlrichtung ist in Abbildung 1.7 gezeigt. Der Detektor ist in einen zentralen Bereich senkrecht zur Strahlrichtung, **Barrel**, und den **Endkappen** in Strahlrichtung aufgeteilt.

Der Spurdetektor

Der Spurdetektor dient zur Impuls- und Ladungsmessung von geladenen Teilchen und ist dem Wechselwirkungspunkt am nächsten, um die Teilchenstreuung zu minimieren. Der Detektor ist in mehrere Lagen aufgeteilt. Wie Abbildung 1.8a zeigt, erfahren geladene Teilchen durch das Magnetfeld B von 3,8 T eine Lorentzkraft. Anhand der Höhe h und der Sehnenlänge L des durch die Teilchenspur beschriebenen Kreissegments kann der transversale Impuls p_T bestimmt werden,

$$p_T \approx \frac{0,3BL^2}{8h}. \quad (1.9)$$

KAPITEL 1. PHYSIKALISCHE FRAGESTELLUNGEN AM LHC UND DAS CMS-EXPERIMENT

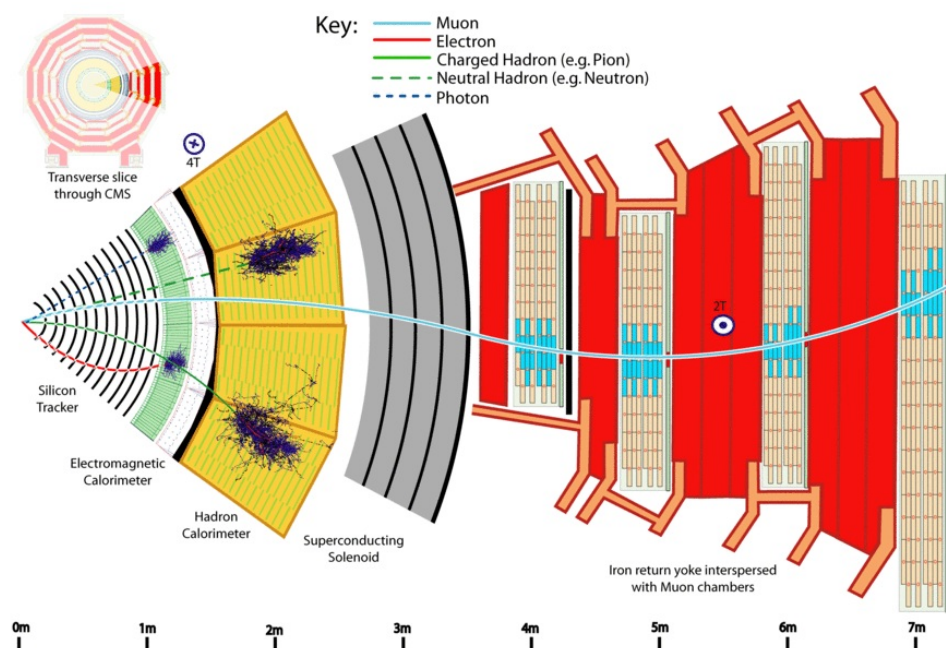


Abbildung 1.7: **Schnittbild des Barrals des CMS-Experiments.** Es sind der Spurdetektor, die beiden Kalorimeter, der Magnet und die Myonkammern dargestellt. Zusätzlich sind die Teilchenspuren und die Energiedeposition verschiedener Teilchen innerhalb des Detektors veranschaulicht;
Quelle: CMS-Öffentlichkeitsarbeit [15]

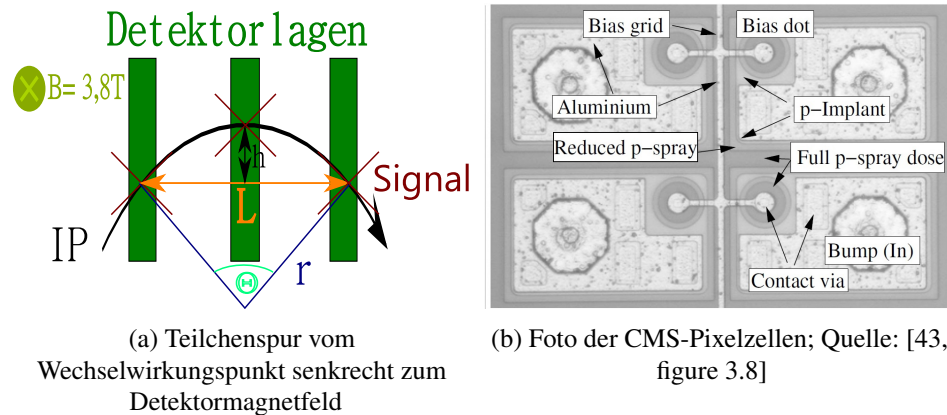


Abbildung 1.8: (a) Die Teilchenspur im Detektor und (b) Foto der CMS-Pixelzelle

Die Auflösung der Ortskoordinaten ist $10\text{ }\mu\text{m}$ und die sich daraus ergebende Impulsauflösung ein bis zwei Prozent für einen Teilchenimpuls von $100\text{ GeV}/c$. Für kleinere Impulse sinkt das Auflösungsvermögen aufgrund von Mehrfachstreuung im Detektormaterial [52].

Durch die hohe Luminosität des LHCs gibt es Mehrfachkollisionen beim Aufeinandertreffen zweier Teilchenpakete. Der Spurdetektor muss daher fein genug unterteilt sein, um alle Teilchenspuren auflösen zu können. Eine gute Ortsauflösung wird auch benötigt um JETs zu erkennen, die Zerfälle von b-Quarks enthalten. Der Spurdetektor besteht aus dem inneren Pixel- und dem äußeren Streifendetektor, wie in Abbildung 1.9 gezeigt wird.

Pixeldetektor Der Pixeldetektor besteht aus drei Zylindern von Pixelsensoren bei Radien von $4,4\text{ cm}$, $7,3\text{ cm}$ und $10,2\text{ cm}$, sowie zwei Ringen im Barrel bei einem Abstand von $\pm 34,5\text{ cm}$ und $\pm 46,5\text{ cm}$ in z-Richtung.

Die Pixelsensoren sind $285\text{ }\mu\text{m}$ dick und wurden mit einer n-in-n-Technologie gefertigt. Die Pixel sind in 52 Spalten und 80 Reihen angeordnet und haben eine Fläche von $100 \times 150\text{ }\mu\text{m}^2$. Eine Pixelzelle wird in Abbildung 1.8b gezeigt. Insgesamt hat der Pixeldetektor eine Sensorfläche von 1 m^2 und besteht aus 66 Millionen Pixeln. Der Pixeldetektor hat eine Ortsauflösung von $10\text{ }\mu\text{m}$ für das Barrel und $20\text{ }\mu\text{m}$ für die Endkappen [43, 38].

Streifendetektor Für größere Abstände vom Wechselwirkungspunkt können, aufgrund des abnehmenden Teilchenflusses, Streifensensoren verwendet werden. Die p-in-n-Siliziumsensoren sind im Barrel $320\text{ }\mu\text{m}$ und in den Endkappen $500\text{ }\mu\text{m}$ dick und haben ein Raster von 80 bis $201\text{ }\mu\text{m}$. Die Gesamtsensorfläche beträgt 198 m^2 und umfasst 9,3 Millionen Streifen.

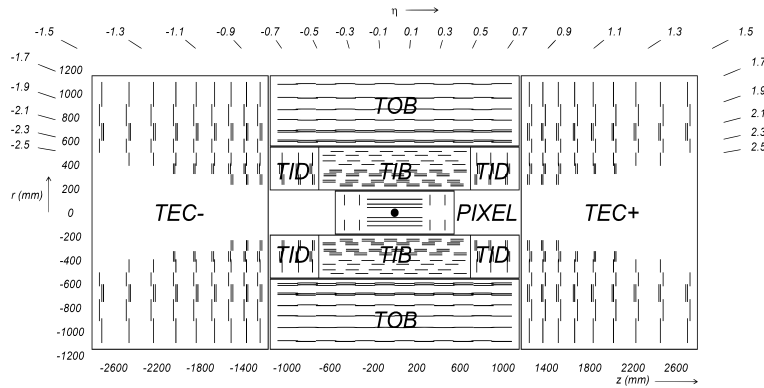


Abbildung 1.9: **Der Spurdetektor** besteht aus dem **Pixeldetektor**, den zentralen Barreldetektoren **Tracker Inner Barrel (TIB)** und **Tracker Outer Barrel (TOB)** und den Endkappendetektoren **Tracker Inner Disk (TID)** und **Tracker End Caps (TEC)**;[40, Figure 3.1]

Der Detektor ist in mehrere Unterdetektoren aufgeteilt, deren jeweilige Position in Abbildung 1.9 dargestellt ist. Die erreichbare Ortsauflösung beträgt $25 \mu\text{m}$ für den inneren Bereich und $35 \mu\text{m}$ für den äußeren Bereich.

Die Kalorimeter

Die Kalorimeter dienen zur Teilchenidentifikation sowie zur Energiemessung der absorbierten Teilchen. Das Kalorimetersystem ist in zwei Unterdetektoren aufgeteilt.

Elektromagnetisches Kalorimeter Das Kalorimeter dient zum Nachweis von Elektronen und Photonen. Es besteht aus 6120 Bleiwolframatkristallen in denen Teilchen elektromagnetische Schauer erzeugen. Die Abklingzeit Szintillationslichtes ist mit 25 ns für 80% Lichtausbeute der Wechselwirkungsrate angepasst [52]. Die Energieauflösung wurde während eines Teststrahlexperimentes mit 20 GeV und 200 GeV Elektronen gemessen. Das Resultat war

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right) = \left(\frac{2,8\%}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{0,12}{E}\right)^2 + (0,30\%)^2, \quad (1.10)$$

mit der Standardabweichung, σ , der gemessenen Gauß-Verteilung und der Energie E in Gigaelektronenvolt.

Hadronisches Kalorimeter Aufgrund ihrer größeren Masse können Hadronen das elektromagnetische Kalorimeter durchdringen und werden erst im hadronischen Kalorimeter gestoppt. Dieses besteht aus einer Sandwichstruktur aus Absorber- und Szintillatorschichten [52]. Zur Absorption werden Messingplatten mit einer Dicke von 40 bis 75 mm verwendet. Messing hat eine kurze hadronische Wechselwirkungslänge und ist unmagnetisch.

KAPITEL 1. PHYSIKALISCHE FRAGESTELLUNGEN AM LHC UND DAS CMS-EXPERIMENT

Das in den Plastiksintillatoren erzeugte Licht wird durch Wellenleiter zu den Silizium-Photodioden geleitet. Die Energieauflösung des hadronischen Kalorimeters ist

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)^2 = \left(\frac{70\%}{\sqrt{E}}\right)^2 + (8\%)^2. \quad (1.11)$$

Der Magnet

Zur Erzeugung des Magnetfeldes von 3,8 T im inneren Bereich und 2 T im Eisenjoch besitzt CMS eine supraleitende, zylindrische Spule deren Windungen aus einer Titan-Niob-Legierung bestehen.

Die Myon-Kammern

Der CMS-Detektor wird von den Myonkammern umschlossen, die den Myonenimpuls messen und als Ereignistrigger dienen. Sie bestehen im zentralen Bereich aus vier Lagen Driftröhren. In den Endkappen werden zum Nachweis der Myonen Proportionalkammern mit Auslekathoden verwendet.

Trigger-System

Durch die hohe Luminosität des LHCs kommt es zu 20 bis 30 Proton-Proton-Wechselwirkungen pro Kollision zweier Teilchenpakete. Durch die Kollisionsfrequenz von 40 MHz ergibt sich somit eine Ereignisrate von 10^9 Kollisionen pro Sekunde. Davon können aufgrund des begrenzten Speicherpotentials nur 100 Ereignisse pro Sekunde dauerhaft gespeichert werden [135, 39].

Ein mehrstufiges Triggersystem erfasst zunächst alle Rohdaten im Level-1-Trigger, der innerhalb von 3 μ s die erste Ereignisselektion vornimmt. Aufgrund der geringen Zeitspanne können nur Informationen der Kalorimeter und der Myonkammern für die Datenauswahl verwendet werden. Auswahlkriterien sind das Vorhandensein von Photonen, Elektronen, Myonen oder JET-Signalen in definierten Detektorbereichen. Zusätzlich wird die transversale Gesamtenergie berücksichtigt.

Die Daten des Level-1-Trigger werden mit einer Rate von $10^6 s^{-1}$ in den High-Level-Trigger weitergeleitet [41].

Kapitel 2

Halbleiter, Silizium und Siliziumsensoren

2.1 Motivation

Um die während der Arbeit erzielten Forschungsergebnisse bei der Untersuchung von Strahlenschäden in Siliziumsensoren bewerten und verstehen zu können, werden im folgendem Kapitel die benötigten Grundlagen der Halbleiterphysik und der Defektentstehung in Silizium eingeführt. Darauf aufbauend werden die Herstellung und der Aufbau von Siliziumsensoren beschrieben.

2.2 Halbleiter

Die elektrischen Eigenschaften eines kristallisierten Materials werden durch die Energiedifferenz des **Leitungsbandminimums (LBM)** E_L und des **Valenzbandmaximums (VBM)** E_V bestimmt. Die Differenz $E_g := E_L - E_V$ wird als **Bandlücke** bezeichnet. Abhängig von der Bandlücke werden Materialien in

- **Leiter bzw. Metalle** : $E_g = 0 \text{ eV}$,
- **Halbleiter** : $0 < E_g \leq 3 \text{ eV}$,
- und **Isolatoren** : $E_g > 3 \text{ eV}$

unterteilt. Bei einem **direkten Halbleiter** befindet sich das Leitungsbandminimum und das Valenzbandmaximum am selben Punkt im reziproken Kristallgitter. Für **indirekte Halbleiter** wie Silizium gilt dieses nicht.

Die in Abbildung 2.1a) gezeigte Anregung eines Elektrons von dem Valenzband in das Leitungsband wird als Bildung eines **Elektron-Loch-Paares** bezeichnet. Der umgekehrte Prozess heißt **Rekombination**.

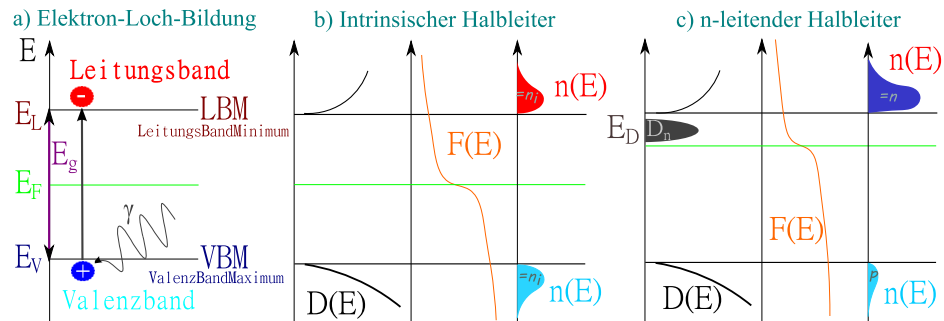


Abbildung 2.1: a) Bandschema des intrinsischen Halbleiters und die Bildung eines Elektron-Lochpaares;

Abhängigkeit der Ladungsträgerdichte $n(E)$ von der Zustandsdichte $D(E)$ und der Fermi-Funktion $F(E)$ für den intrinsischen (b) und den dotierten Halbleiter (c)

Die Zustandsdichte $D(E)$ der Elektronen ist proportional zur Ableitung der Zahl der Zustände $N(E)$ pro Volumeneinheit V

$$D(E) = \frac{dN(E)}{V \cdot dE}, \quad (2.1)$$

und kann an den Bandkanten näherungsweise als Wurzelfunktion beschrieben werden. Die Ladungsträgerkonzentration $n(E)$ ist das Produkt aus der Zustandsdichte und, der in Abbildung 2.1b) gezeigten, Fermi-Funktion [143]. Die Fermi-Funktion

$$F(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{k_B T}} + 1}. \quad (2.2)$$

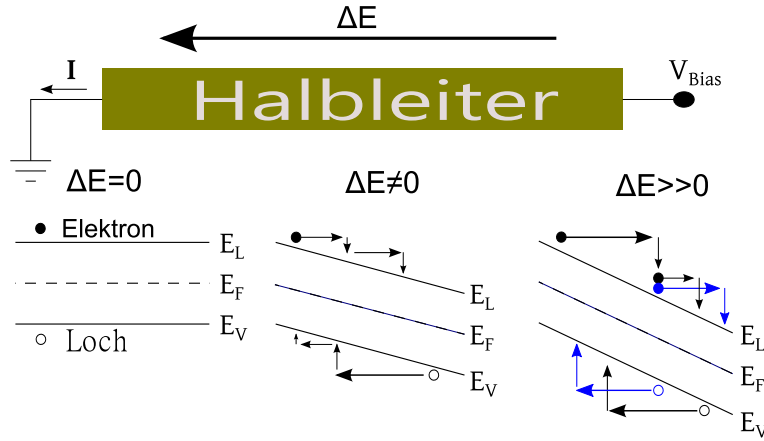
beschreibt die Besetzungswahrscheinlichkeit eines Zustandes bei der Energie in Abhängigkeit von der Temperatur T . k_B ist die Boltzmann-Konstante und E_F die **Fermi-Energie**, bei der die Besetzungswahrscheinlichkeit genau ein halb ist. Für intrinsische Halbleiter gilt [18]

$$E_F = \frac{E_V + E_L}{2} + 3/4 \cdot k_B T \cdot \ln(m_p/m_n), \quad (2.3)$$

wobei

$$m_{p/n} = \hbar^2 (d^2 E / dk^2)^{-1} \quad (2.4)$$

die effektive Masse der Löcher bzw. Elektronen ist. \hbar ist das Planck'sche Wirkungsquant h geteilt durch 2 mal Pi und k bezeichnet die Wellenzahl.


 Abbildung 2.2: **Spannungsinduzierte Elektronen- und Löcherdiffusion.**

Gezeigt ist das Bandschema im spannungslosen Zustand (links), der Ladungstransport mit anschließender Energierelaxation bei angelegter Spannung (Mitte) und für große Spannungen die Ladungsträgergeneration (blau) durch Stöße (rechts). Die Pfeile geben die Bewegungsrichtung der Ladungsträger an.

Die intrinsische Ladungsträgerdichte n_i lässt sich aus den effektiven Zustandsdichten des Leitungsbandes

$$D_L = 2 \left(2\pi m_n k_B T / h^2 \right)^{3/2} \stackrel{(Si, 300K)}{\approx} 2,86 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3},$$

und des Valenzbandes

$$D_V = 2 \left(2\pi m_p k_B T / h^2 \right)^{3/2} \stackrel{(Si, 300K)}{\approx} 2,66 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3},$$

berechnen:

$$n_i = \sqrt{D_C D_V} \cdot e^{-E_g / 2k_B T} \stackrel{(Si, 300K)}{\approx} 1,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}. \quad (2.5)$$

Für die Elektronen- und Löcherdichte

$$n = n_i \cdot e^{\frac{E_F - E}{k_B T}} \quad \text{bzw.} \quad p = n_i \cdot e^{\frac{E - E_F}{k_B T}}$$

gilt das **Massenwirkungsgesetz**

$$n_i^2 = p \cdot n. \quad (2.6)$$

Ladungstransport in Halbleitern

Durch eine Potentialdifferenz V_{Bias} werden die Energieniveaus der Bänder gebogen und es tritt eine gerichtete Elektron- und Lochbewegung entlang der Feldlinien auf.

Abbildung 2.2 zeigt den gerichteten Ladungstransport und die anschließende Energierelaxation. Bei hohen Feldstärken ist der Energieübertrag so groß, dass neue Ladungsträgerpaare erzeugt werden. Der Volumenstrom

$$I(V_{Bias}) = \underbrace{eV_{Bias}(\mu_n n + \mu_p p)}_{\text{Feldinduzierter Strom}} + e \underbrace{\left(D_n \frac{dn}{dx} + D_p \frac{dp}{dx} \right)}_{\text{Diffusionsstrom}} \quad (2.7)$$

ist abhängig von der Elementarladung e , den Elektronen- bzw. Löcherdiffusionskonstanten $D_{n/p}$ und der Elektronen- bzw. Löcherbeweglichkeit $\mu_{n/p}$. Der Strom hat dabei eine quadratische Abhängigkeit von der Temperatur [143]

$$I(T) = I(T_0) \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^2 \exp \left(\frac{-E_g}{2k_B} \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right] \right). \quad (2.8)$$

Dotierung

Durch Fremdatome können in der Bandlücke eines Grundmaterials zusätzliche Energieniveaus erzeugt werden. Das gezielte Einbringen von Fremdatomen wird als **Dotierung** bezeichnet.

Atome mit mehr Valenzelektronen als das Grundmaterial haben Energieniveaus E_D innerhalb Bandlücke nahe des Leitungsbandminimums. Die überschüssigen Valenzelektronen können thermisch in das Leitungsband angeregt werden, d.h. das Dotieratom ist ein **Elektronendonator**. Ein Material, in dem Elektronen die Majoritätsladungsträger sind, heißt **n-leitend** [72, 143].

Ein Dotieratom mit weniger Valenzelektronen als das Grundmaterial hat innerhalb der Bandlücke Energieniveaus E_A nahe dem Valenzbandmaximum und kann thermisch angeregte Elektronen einfangen. Dabei bildet sich eine lokalisierte negative Ladung am Dotieratom und ein frei bewegliches **Elektronloch**, d.h. das Dotieratom fungiert als **Elektronakzeptor**. Ein Material, in dem Elektronen **Minoritätsladungsträger** sind, wird als **p-leitend** bezeichnet.

Bei niedrigen Temperaturen dissoziieren zuerst die energetisch den Bandkanten nahen Zustände der Fremdatome. Der Anteil der dissoziierten Donatoren n_D^+ und Akzeptoren n_A^- ist abhängig von der energetischen Lage in der Bandlücke $E_{A/D}$ und der Temperatur [47]

$$n_D^+ = \frac{n_D}{1 + 2e^{\frac{E_f - E_D}{k_B T}}} \quad (2.9)$$

bzw.

$$n_A^- = \frac{n_A}{1 + 4e^{\frac{E_A - E_f}{k_B T}}} \quad (2.10)$$

Bei hohen Temperaturen dominiert die Eigenleitung durch intrinsische Ladungsträger, deren Konzentration durch die Formel 2.5 beschrieben wird.

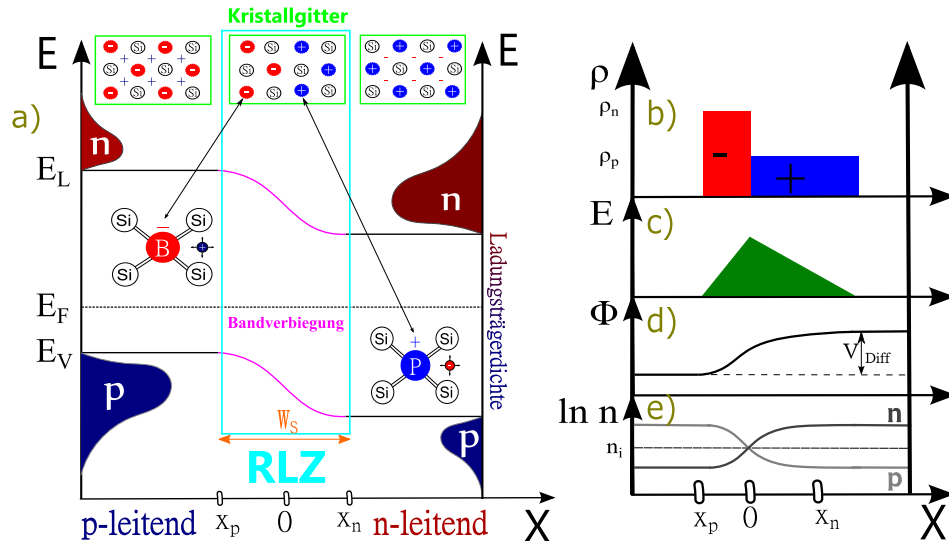


Abbildung 2.3: **Der pn-Übergang**; (a) Bandschema und Ladungsträgerdichten des abrupten pn-Übergangs. Auf der linken Seite ist der p-leitende Bereich, in dem sich frei **bewegliche Löcher p** und ortsfeste **negative Ladungen n** befinden. Auf der rechten Seite ist der n-leitende Bereich mit den ortsfesten **positiven Ladungen n** und den **freien Elektronen**. Zwischen beiden Bereichen befindet sich die Raumladungszone PLZ, in der die freien Ladungsträger rekombiniert sind; (b) Idealierte Ladungsträgerdichten als Funktion des Abstandes von der Kontaktfläche. x_p und x_n sind die Dotierungstiefen der entsprechenden Gebiete; (c) Verlauf des elektrischen Feldes; (d) Verlauf des Potentials und der Diffusionsspannung V_{Diff} ; (e) Ladungsträgerdichten für Elektronen n und Elektronenlöcher p ; Frei nach [18, 76]

Der pn-Übergang

An der Grenzfläche zwischen einem p- und einem n-leitenden Gebiet entsteht ein **pn-Übergang**, welcher für die weiteren Betrachtungen als abrupt idealisiert wird und in Abbildung 2.3a gezeigt ist. Elektrische Bauelemente, die aus einem pn-Übergang, bestehen werden als **Dioden** bezeichnet.

Aufgrund des Konzentrationsunterschiedes von Elektronen und Löchern an der Grenzfläche kommt es zu einem Diffusionsstrom [47]. Durch Rekombination der Ladungsträger entsteht eine **Raumladungszone (RLZ)**, deren elektrisches Feld dem Diffusionsstrom entgegenwirkt. Im Gleichgewicht sind Feld- und Diffusionsstrom gleich groß. Da sich das Fermi-Niveau an der Grenzfläche angleicht, kommt es zu der sogenannten **Bandverbiegung** an der Grenzfläche.

Das in Abbildung 2.3b gezeigte Potential des pn-Übergangs lässt sich durch die Poisson-Gleichung berechnen

$$\nabla \Phi(\vec{r}) = -\frac{\rho(\vec{r})}{\epsilon_0 \epsilon_r} . \quad (2.11)$$

ρ ist hierbei die Ladungsträgerdichte. Für den eindimensionalen Fall ergibt sich für eine konstante Ladungsträgerdichte unter Verwendung der Annahme, dass $E(x \leq X_p) = E(x \geq X_n)$ gleich Null ist, die in Abbildung 2.3c gezeigt die Feldverteilung.

$$E(x) = -\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r} \int \rho(x) dx = -\frac{e\rho_p}{\epsilon_0 \epsilon_r} (x_p - x)_{x_p < x < 0} \quad (2.12)$$

$$E(x) = -\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r} \int \rho(x) dx = -\frac{e\rho_n}{\epsilon_0 \epsilon_r} (x_n - x)_{x_n > x \geq 0} \quad (2.13)$$

Die **Diffusionsspannung** V_{Diff} für die Dotierungskonzentrationen n_A und n_D ergibt sich durch Integration des elektrischen Feldes.

$$V_{Diff} = -\int_{x_p}^{x_n} E(x) dx = U_T \cdot \ln\left(\frac{n_A n_D}{n_i^2}\right) \quad (2.14)$$

mit der **Temperaturspannung** $U_T = k_B T / e$ [72]. Die Breite W_{S_0} der Raumladungszone ohne externe Spannung ist [72]

$$W_{S_0} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_r}{e} \left(\frac{n_A + n_D}{n_A \cdot n_D} \right) V_{Diff}}. \quad (2.15)$$

Durch das Anlegen einer externen Spannung V_{Bias} am pn-Übergang kommt es zur gerichteten Diffusion der Ladungsträger über den pn-Übergang. Die **Sperrrichtung** wird so definiert, dass die Majoritätsladungsträger von dem pn-Übergang weg driften. Dabei kommt es zur **Ladungsträgerverarmung** am Übergang. Die Weite des verarmten Bereichs ist

$$W_S = W_{S_0} \cdot \sqrt{\frac{V_{Diff} + V_{Bias}}{V_{Diff}}}. \quad (2.16)$$

Aus der Verarmungstiefe W_S lässt sich die Sperrschichtkapazität C_S berechnen

$$C_S = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \cdot (w \cdot L)}{W_S} = \sqrt{\frac{e \cdot \epsilon_0 \epsilon_r \cdot n_A n_D}{2(n_A + n_D) V_{Diff}}}, \quad (2.17)$$

wobei $w \cdot L$ die Größe der Kontaktfläche ist. Der über den pn-Übergang fließende Strom wird durch die **Ideale Diodengleichung** beschrieben [143],

$$I = I_p + I_n = I_S \left(e^{\frac{eV_{Bias}}{k_B T}} - 1 \right), \quad (2.18)$$

mit dem **Sättigungsstrom**

$$I_S = e \left(\frac{p \cdot D_p}{\tau_p} + \frac{n \cdot D_n}{\tau_n} \right). \quad (2.19)$$

$\tau_{n/p}$ sind dabei die Lebensdauern der Elektronen und Löcher im Silizium.

Bei Vergrößerung der Sperrspannung über den kritischen Wert V_{Break} kommt es zu einem **Durchbruch** und einem exponentiell anwachsenden Strom. Der Durchbruch kann durch drei Mechanismen verursacht werden:

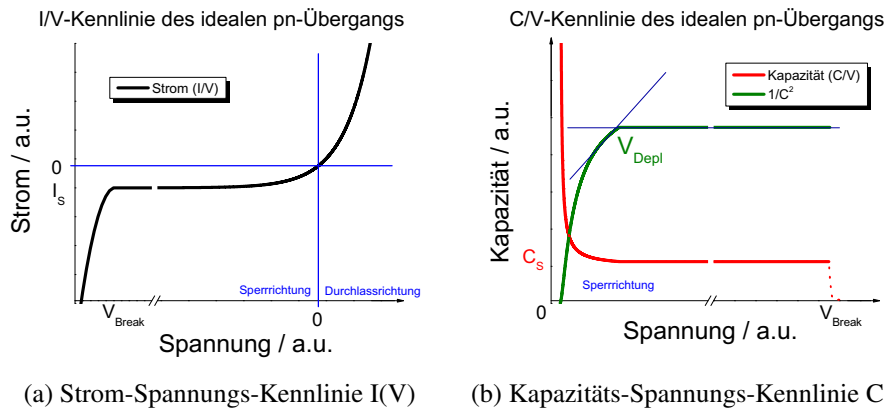


Abbildung 2.4: **Abhängigkeit des Stromes und der Kapazität des idealen pn-Übergangs von der Spannung V_{Bias} .** I_s ist der Sättigungsstrom und C_s die Sperrschichtkapazität. Gekennzeichnet sind die Durchbruchsspannung V_{Break} und die Verarmungsspannung V_{Depl} bei der das gesamte Volumen eines Bauelements verarmt ist.

1. **Lawineneffekt** - Wie in Abbildung 2.2 gezeigt, können durch eine hohe Feldstärke Ladungsträger so stark beschleunigt werden, dass sie durch Stoßprozesse weitere Ladungsträgerpaare erzeugen.
2. **Zener-Effekt** - Bei hohen Dotierungskonzentrationen kann die Bandverbiegung so stark werden, dass eine innere Feldemission auftritt. Das Valenzbandmaximum des p-leitenden Bereichs ist dabei größer als das Leitungsbandminimum des n-leitenden Bereichs und es können Elektronen durch die Potentialdifferenz tunneln.
3. **Thermischer Durchbruch** - Durch einen hohen Sperrstrom kommt es durch Stoßprozesse lokal zu einer Temperaturerhöhung, wodurch in einer positiven Rückkopplung, thermisch weitere Ladungsträgerpaare generiert werden. Die Stromänderung in Abhängigkeit von einer Temperaturänderung wird durch Formel 2.8 beschrieben.

Unter der Berücksichtigung aller beschriebenen Effekte ergeben sich die Kennlinien des pn-Übergangs wie sie in Abbildung 2.4 dargestellt sind.

2.3 Physikalische Eigenschaften von Silizium

Silizium ist ein Element der vierten Hauptgruppe und hat die Ordnungszahl 14. Die Elektronenkonfiguration ist $[1s^2]_{He}[2s^2 2p^6]_{Ne}[3s^2 3p^2]$ mit den abgeschlossenen Helium- und Neonschalen und der halbgefüllten Argonschale. In der Argonschale sind zwei gefüllte s-Niveaus und zwei gefüllte p-Niveaus für die Valenzbindung vorhanden. Durch Hybridisierung bilden sich vier sp^3 -Orbitale, die tetraederförmig angeordnet sind. Dadurch bildet sich die in Abbildung 2.5a gezeigte diamantartige Kristallstruktur. Das Bändermodell von Silizium ist in Abbildung 2.6a dargestellt. Das Valenzbandmaximum befindet sich am Γ -Punkt der, in Abbildung 2.5b gezeigten, Brillouin-Zone und wird durch ein zweifach entartetes 3s-Niveau gebildet. Das Leitungsbandminimum ist am X-Punkt und besteht aus den nicht vollständig gefüllten 3p-Niveaus.

Die durchschnittliche Übergangsenergie aus dem Valenzband in das Leitungsband lässt sich aus der Zustandsdichte berechnen und ist, wie in Abbildung 2.6 gezeigt, 3,6 eV für Silizium. Die Bandlücke nimmt mit steigender Temperatur T ab

$$E_g(T) = 1,17 - 4,74 \times 10^{-4} \cdot \frac{T^2}{(T + 636)} \text{ eV} \quad (2.20)$$

und ist von der **effektiven Ladungsträgerdichte** N_{eff} abhängig [143]

$$\Delta E_g = 22 \cdot \sqrt{\frac{N_{eff}}{10^{18}}} \text{ meV} . \quad (2.21)$$

Die wichtigsten Eigenschaften von Silizium für den Sensoreinsatz sind in der Tabelle 2.1 aufgelistet [76, 130].

Defekte im Silizium

Der reale Siliziumkristall enthält eine Reihe von Defekten [123]. Bekannte Defektgruppen sind [151]:

- **Fremdatome**, wie produktionsbedingte Verunreinigungen oder gezielt eingebrachte Dotierungsatome.
- **Fehler in der Kristallbindung**, wie z.B. nicht besetzte Gitterpunkte oder **Zwischengitteratome**. Dabei wird zwischen Punkt- und Gruppendefekten unterschieden.
- **Oberflächendefekte**, wie z.B. nicht abgesättigte Bindungen.

Ob ein Defekt als Donator oder Akzeptor fungiert, ist von den Energieniveaus des Defektzustandes innerhalb der Bandlücke abhängig. Defekte mit einem energetisch großen Abstand zu den Bandkanten sind **Rekombinationszentren**, und mindern die Ladungsträgerlebensdauer. Defektzustände nahe den Bandkanten dissoziieren und erhöhen die Ladungsträgerkonzentration.

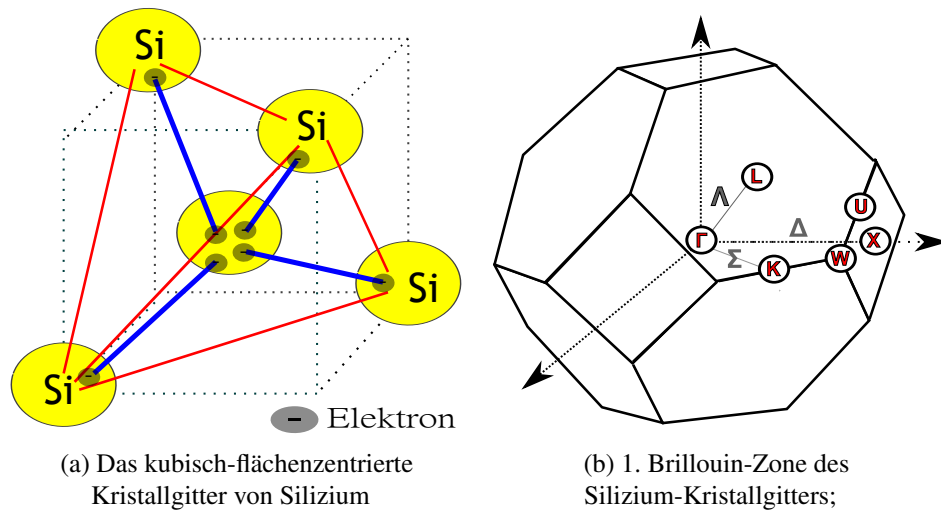


Abbildung 2.5: **Das Kristallgitter von Silizium.** Frei nach [134]

Physikalische Größe	Symbol	Wert
Bandlücke	E_g	1,17 eV
Dichte	ρ	2,52 g/cm ³
Dielektrizitätskonstante Si	ϵ_r	11,9
Dielektrizitätskonstante SiO ₂	ϵ_r	3,9
Diffusionskonstante Elektronen	D_n	3,7510 ⁻⁵ m ² /s
Diffusionskonstante Löcher	D_p	1,2510 ⁻⁵ m ² /s
Energieverlust (MIP)		390 eV/μm
Elektronenmobilität	μ_e	1350 cm ² /Vs
Intrinsische Ladungsträgerkonzentration	n_i	1,45 × 10 ¹⁰ cm ⁻³
Intrinsische Leitfähigkeit	ρ_i	235 × 10 ³ Ω ⁻¹ cm ⁻¹
Löchermobilität	μ_p	450 cm ² /Vs
Maximale (intrinsische) Feldstärke	E_{max}	30 V/μm
Paarerzeugungsenergie	E_{ex}	3,6 eV
Strahlungslänge	X_0	9,36 cm

Tabelle 2.1: **Für den Sensorbetrieb wichtige Eigenschaften von Silizium** [106, 143, 76, 134, 18]. Einige der aufgelisteten Eigenschaften hängen von der Temperatur und Kristallorientierung ab und sind für einkristallines Silizium in der <111>-Orientierung und Raumtemperatur aufgelistet.

symbol	Defekt- beschreibung	Energie- niveau [eV]	Annealing- Temperatur [K]	Typ
Fehlstellen				
V	Unbesetzter Gitterplatz	$E_L - 0,09$ $E_V + 0,11$	90 150	n p
V-H	Passivierte Fehlstelle	$E_C - 0,43?$	500	n
V_2	Doppelte Fehlstelle	$E_L - 0,23$	600	n
		$E_L - 0,39$ $E_V + 0,21$	600 00	n p
Zwischengitteratom				
I	Siliziumatom zwischen dem Kristallgitter	$E_L - 0,4$	450?	n
C_i	Kohlenstoffatom zwischen dem Kristallgitter	$E_L - 0,1$	650	n
		$E_V + 0,28$	650	p
Substituent				
S	Fremdatom auf Gitterplatz	siehe Tabelle 2.3		
Frenkel-Defekt				
VI	Fehlstelle und Zwischengitteratom	$E_V + 0,2$	70?	—
A-Center				
VO	Sauerstoffatom und Fehlstelle	$E_L - 0,18$	650	n?
V_2O	Sauerstoffatom und Doppelfehlstelle	$E_L - 0,24?$	250?	n?

Tabelle 2.2: **Defekte in Silizium** [91, 151, 102, 145, 29, 113, 122]. Die Energieniveaus beziehen sich auf das Valenzbandmaximum E_V bzw. Leitungsbandminimum E_L . Die Annealing-Temperatur ist die Temperatur, bei der die Defekte thermisch ausheilen. Eine grafische Darstellung der Defekte ist in Abbildung 2.7 gegeben. Der Typ gibt an, ob der Defekt als Akzeptor (n) oder Donator (p) fungiert.

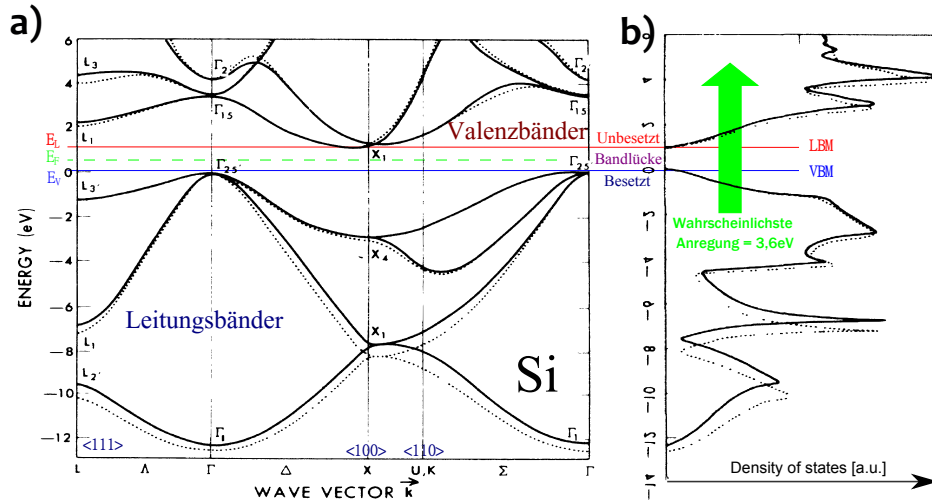


Abbildung 2.6: **Die Bandstruktur von Silizium.** a) Die Zustände unterhalb der Fermienergie sind lokalisiert d.h. bindend, die Zustände oberhalb delokalisiert, d.h. antibindend; b) Die aus dem Bandschema berechnete Zustandsdichte; [33, Fig.2 und Fig.4]

Die wichtigsten Defekte in Silizium sind in Tabelle 2.2 aufgelistet und in Abbildung 2.7 dargestellt. Die energetische Lage der Defektzustände von ausgewählten Fremdatomen sind in der Tabelle 2.3 angegeben.

Eine Untersuchungsmethode für Defekte wird **Thermally Stimulated Current (TSC)** genannt [46]. Bei TSC-Messungen wird die Probe soweit gekühlt, dass alle Defektzustände besetzt werden. Wird anschließend die Temperatur schrittweise erhöht, dissoziieren die Defekte wieder. Die frei werdenden Ladungsträger werden als Strom gemessen. Die Stromstärke ist abhängig von der Defektkonzentration und die Dissoziationstemperatur ist abhängig von der energetischen Lage des Defekts.

Polysilizium

Bei polykristallinem Silizium sammeln sich an den Kristallgrenzen Defekte, die dort elektrisch inaktiviert werden oder als Ladungsfallen fungieren [12]. Der Ladungstransport zwischen den Kristallen wird für hohe Temperaturen als thermische Diffusion und für niedrige Temperaturen als Tunnelprozess beschrieben. Typische Defektkonzentrationen an den Kristallgrenzen sind in der Größenordnung 10^{12} cm^{-3} [133, 77].

Polysilizium kann in erster Näherung elektrisch als Ohmscher Widerstand betrachtet werden [125]. Dieses ist vorteilhaft für den Sensorbau, da die einzelnen Polysiliziumkristalle die gleiche Gitterstruktur wie das Siliziumsubstrat haben, und es dadurch keine Anpassungsdefekte an der Grenzfläche gibt.

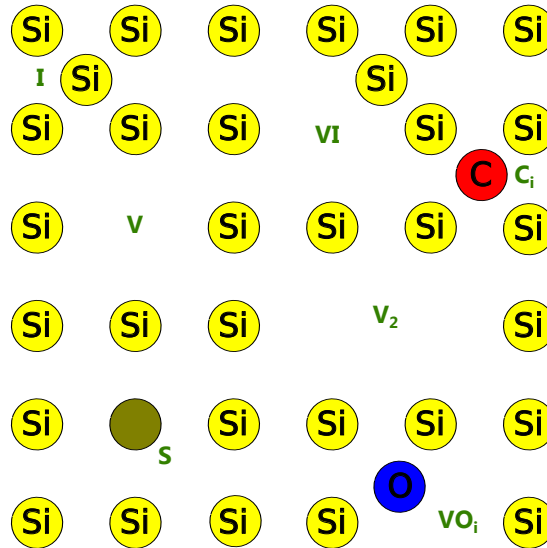


Abbildung 2.7: Schematische Veranschaulichung der Defekttypen. Die verwendeten Bezeichnungen sind in Tabelle 2.2 aufgeführt; Frei nach [76, Fig1.50]

Fremdatom	Akzeptorlevel	Donatorlevel
Al	$E_V + 0,072 \text{ eV}$	
As		$E_L - 0,054 \text{ eV}$
Au	$E_L - 0,55 \text{ eV}$	$E_V + 0,35 \text{ eV}$
B	$E_V + 0,045 \text{ eV}$	
Cu	$E_V + 0,37 \text{ eV}; E_V + 0,52 \text{ eV}$	$E_V + 0,24 \text{ eV}$
Fe		$E_V + 0,39 \text{ eV}$
Ga	$E_V + 0,074 \text{ eV}$	
In	$E_V + 0,157 \text{ eV}$	
Ni	$E_L - 0,35 \text{ eV}; E_V + 0,23 \text{ eV}$	
P		$E_L - 0,045 \text{ eV}$
Pt	$E_V + 0,36 \text{ eV}; E_L - 0,25 \text{ eV}$	$E_V + 0,35 \text{ eV}$
Sb		$E_L - 0,043 \text{ eV}$
Zn	$E_V + 0,32 \text{ eV}; E_L - 0,5 \text{ eV}$	

Tabelle 2.3: Energieniveaus von Fremdatomen in Silizium in Bezug auf das Energieniveau des Leitungsbands E_L bzw. des Valenzbands E_V [134, 129, 60]

2.3.1 Strahlungsschäden bei Silizium

NIEL-Theorie

Die **Non ionizing energy loss (NIEL)**-Theorie beschreibt den Energieverlust eines Teilchens durch nicht ionisierende Stöße [118]. Der NIEL-Energieverlust ist abhängig von der Teilchenart, der Teilchenenergie und dem bestrahlten Material. Der Energieverlust wird in Abhängigkeit der Energie E und des Streuwinkels Θ wie folgt parametrisiert

$$D(E) = \frac{N_A}{A} \int_0^\pi \left(\frac{d\sigma(\Theta, E)}{d\Omega} \right) T(\Theta, E) L(T(\Theta, E)) d\Omega. \quad (2.22)$$

Dabei ist N_A die Avogadro Konstante, A die Atommasse, $d\sigma/d\Omega$ der differenzielle Wechselwirkungsquerschnitt für die Erzeugung von Gitterdefekten, $T(\Theta, E)$ die durchschnittliche Rückstoßenergie und $L(T(\Theta, E))$ sind die Lindhard-Faktoren [100], die den Anteil der nichtionisierenden Stöße beschreiben. Die Normierung des Teilchenflusses $\Phi(E)$ auf die Referenz von 1 MeV Neutronen geschieht über den Härtefaktor κ [107]

$$\kappa = \frac{\int D(E) \Phi(E) dE}{D_{Neutron}(1 \text{ MeV}) \cdot \int \Phi(E) dE}. \quad (2.23)$$

Der Äquivalentfluß für 1 MeV Neutronen n_{eq} ist [120]

$$\Phi_{eq} = \kappa \int \Phi(E) dE. \quad (2.24)$$

Ergebnisse für Silizium Die Mindestenergie um Gitterdefekte in Silizium zu erzeugen ist 21 eV [118]. Berechnungen zeigen, dass der NIEL-Energieverlust für Teilchenenergien größer 1 GeV für alle Hadronen nahezu konstant ist [9]. Abbildung 2.8 zeigt TSC-Messungen nach Proton- bzw. Neutronbestrahlung. Bei einem gleich großen Äquivalenzfluß entsteht durch Protonbestrahlung vermehrt der E(30K)-Defekt, während für Neutronbestrahlung die Entstehungsrate der Doppelfehlstelle V_2 größer ist. Wie Abbildung 2.9 zeigt, ist der E(30K)-Defekt ein Donatorzustand und die Doppelfehlstelle ein Akzeptor d.h. die elektrische Wirkung beider Strahlungstypen ist gegensätzlich.

Annealing

Strahlungsdefekte können durch thermische Prozesse ausheilen. Dieser Prozess wird „**Annealing**“ genannt. Abbildung 2.10 zeigt, dass zunächst die Ladungsträgerdichte sinkt „**beneficial annealing**“. Durch weiteres Annealing kommt es zu einem erneuten Anstieg der Ladungsträgerdichte „**reverse annealing**“.

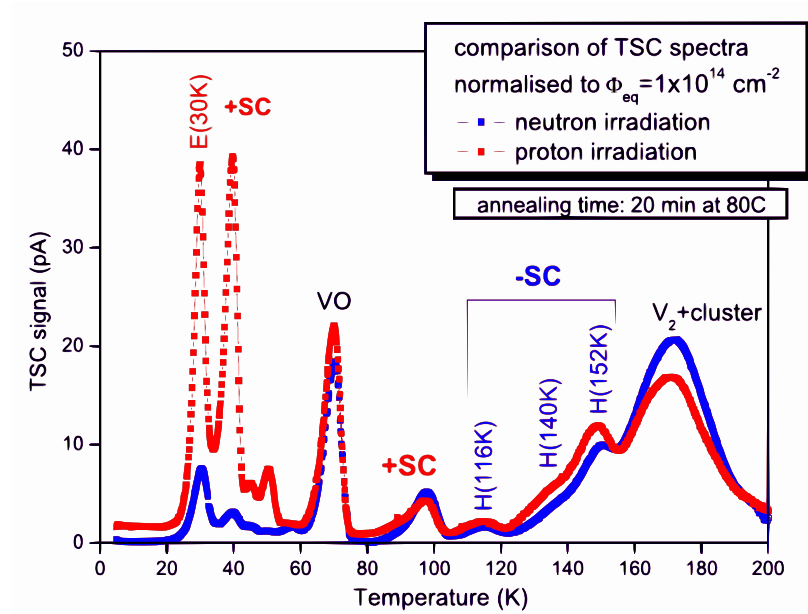


Abbildung 2.8: TSC-Messung von Silizium nach Proton- bzw. Neutronbestrahlung;
[1, Fig.1]

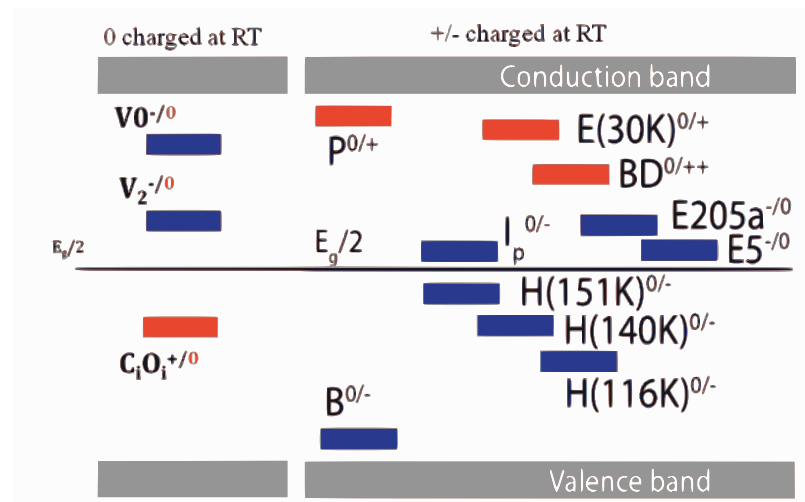


Abbildung 2.9: Energieniveaus von ausgewählten Defekten innerhalb der
Bandlücke von Silizium. Rot sind Donator- und Blau Akzeptorzustände;
[137, Figure4]

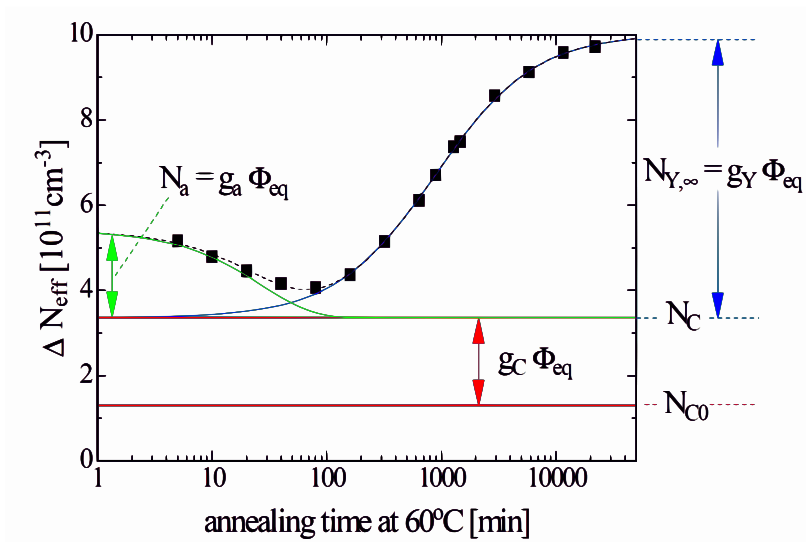


Abbildung 2.10: Änderung der effektiven Ladungsträgerkonzentration als Funktion der Annealing-Zeit. [108, Fig.6]

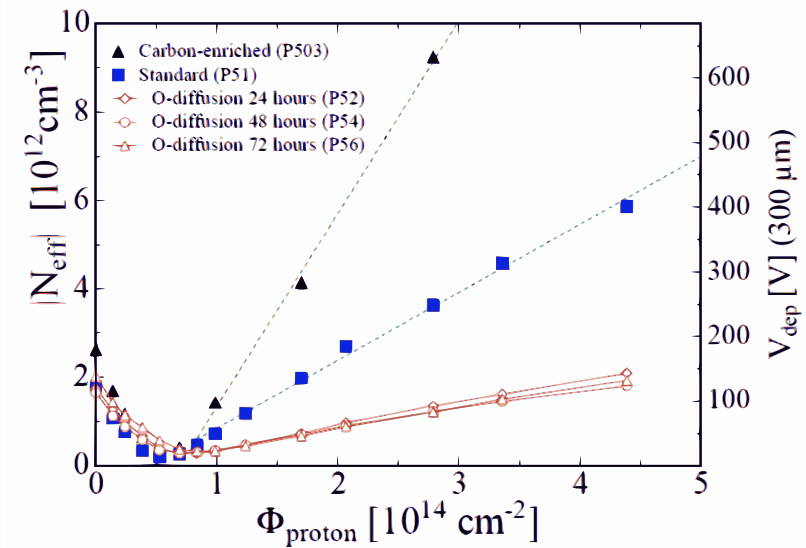


Abbildung 2.11: Einfluss von Kohlenstoff- und Sauerstoffanreicherung auf die Änderung der effektiven Ladungsträgerkonzentration als Funktion des Strahlenflusses; [109, Fig. 2]

Defektreaktionen Während des Annealings werden Defektreaktionen ausgelöst, die zum teilweisen Ausheilen der Defekte oder zur Defektumwandlung führen. Diese Reaktionen können über Verunreinigungen gesteuert werden. Den Einfluß auf die effektive Ladungsträgerkonzentration einer Kohlenstoff- bzw. Sauerstoffanreicherung zeigt Abbildung 2.11.

Eine wichtige Funktion haben Sauerstoffatome [110]. So kann eine Fehlstelle V mit einem Sauerstoffzwischengitteratom O_i reagieren $V + O_i \longrightarrow VO$ und ein A-Center bilden. Alternativ kann die Fehlstelle mit einem Sauerstoffdimer O_2 zu einem elektrisch inaktiven VO_2 -Komplex werden [28].

Die Bildung des V_2O -Komplexes, $VO + V \longrightarrow V_2O$, ist in Sauerstoff angereichertem Material unterdrückt. Dieser Defekt wird als eine der Hauptursachen der Sensordegeneration diskutiert [70, 138].

Da Kohlenstoff dieselbe elektronische Struktur der äußeren Elektronenschalen wie Silizium hat, wird es in das Kristallgitter eingebaut. Durch Bestrahlung können Kohlenstoffzwischengitteratome C_i entstehen, welche als Ladungsfallen fungieren [107]. Auch Wasserstoff spielt eine wichtige Rolle, da er eine passivierende Wirkung hat, $VO + H \longrightarrow VOH$, und die Bildung von Sauerstoffdimern fördert [70].

Weitere wichtige Defektreaktionen sind die Annihilation von Zwischengitteratom und Fehlstelle $V + I \longrightarrow Si_{\text{Kristall}}$, die Defektsammlung in Defektfallen und die Bildung von Doppelfehlstellen $V + V \longrightarrow V_2$ [99].

Strahlungsdefekte und der Einfluß auf makroskopische Eigenschaften

Anstieg des Dunkelstromes Durch den, durch Bestrahlung verursachten, Anstieg der Defektkonzentration, erhöht sich die Ladungsträgerdichte im Silizium. Dieses führt zu einem Anstieg des Dunkelstromes. Der Anstieg des Dunkelstromes durch den Strahlenfluß Φ wird über den **Schädigungsfaktor** α charakterisiert

$$\Delta I = \alpha \cdot \Phi. \quad (2.25)$$

Der Wert von Silizium ist Aufgrund unterschiedlicher Fremdatomkonzentrationen abhängig vom Herstellungsprozess und beträgt etwa $4,0 \times 10^{17} \text{ Acm}^{-1}$ [119, Table 1].

Typumwandlung Die bestrahlungsinduzierten Defekte sind überwiegend Akzeptoren, was zu einer Typumwandlung von n-leitendem Material führt [81]. Wie Abbildung 2.12 zeigt, sinkt durch Bestrahlung zunächst die effektive Ladungsträgerkonzentration. Durch weitere Bestrahlung steigt die Ladungsträgerkonzentration wieder und das Material wird p-leitend [29].

Dieser Effekt hat Einfluß auf den Sensorbetrieb [110] da eine immer höhere Betriebsspannung angelegt werden muss, um eine vollständige Verarmung des Sensors zu erreichen. Technisch lässt sich dieses Problem durch die Verwendung von n-in-p- oder n-in-n-Sensoren umgehen.

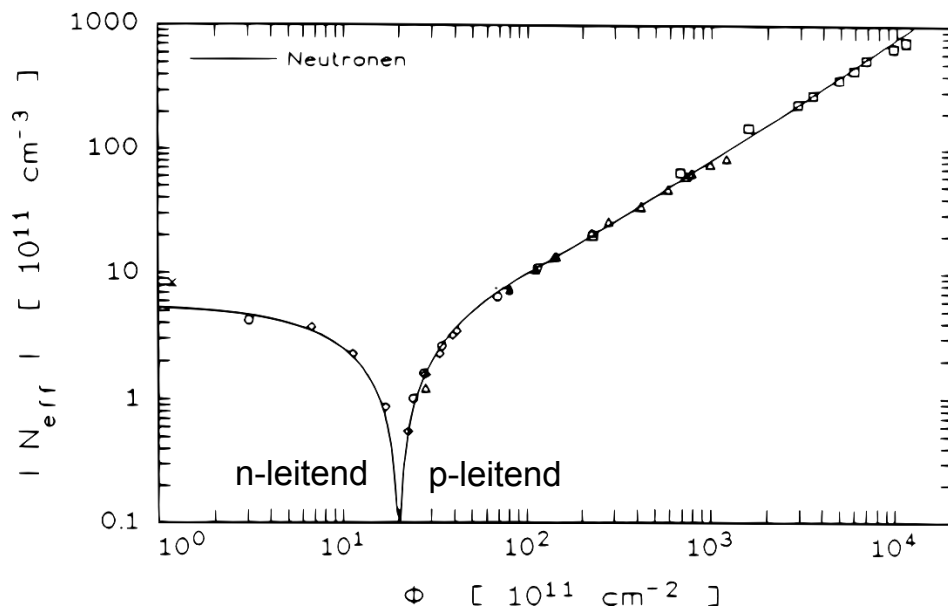


Abbildung 2.12: **Typumwandlung.** Änderung der effektiven Ladungsträgerkonzentration in n-leitendem Material als Funktion der Strahlendosis von Hadronbestrahlung;
[154, Fig. 5.11]

Da die Verarmung von dem p-leitenden Bereich in den n-leitenden Bereich wächst [8], haben n-in-p-Sensoren den zusätzlichen Vorteil, dass sie auch bei nicht vollständiger Verarmung ortsauflösend sind, während n-leitende Sensoren immer vollständig verarmt sein müssen [152].

Ladungssammlungseffizienz Die durch Bestrahlung hervorgerufenen Defekte senken die Ladungssammlungseffizienz, da ein Teil der erzeugten Ladungen von Defekten eingefangen werden. Die eingefangenen Ladungen werden erst bei einer erneuten Defekt-Dissoziation wieder frei und tragen damit zur Erhöhung des Dunkelstromes bei [114].

Vergleich der Strahlenhärte von verschiedenen Siliziumsubstraten

Da unterschiedliche Siliziumsubstrate produktionsbedingt verschiedene Verunreinigungen haben, sind sie unterschiedlich strahlenhart [75, 95, 121, 105, 17]. Abbildung 2.13 zeigt die Änderung der Verarmungsspannung für Standard-Float-Zone-Silizium (FZ), Sauerstoff angereichertes Float-Zone-Silizium (DOFZ), Czochralski-Silizium (Cz-Si) und Magnetic-Czochralski-Silizium (MCz) in Abhängigkeit des Strahlungsflusses. Für Czochralski-Silizium ist die Änderung kleiner als für Float-Zone-Silizium. Ähnliche Ergebnisse zeigen Untersuchungen von Harkonen et Al. [75, Fig.2].

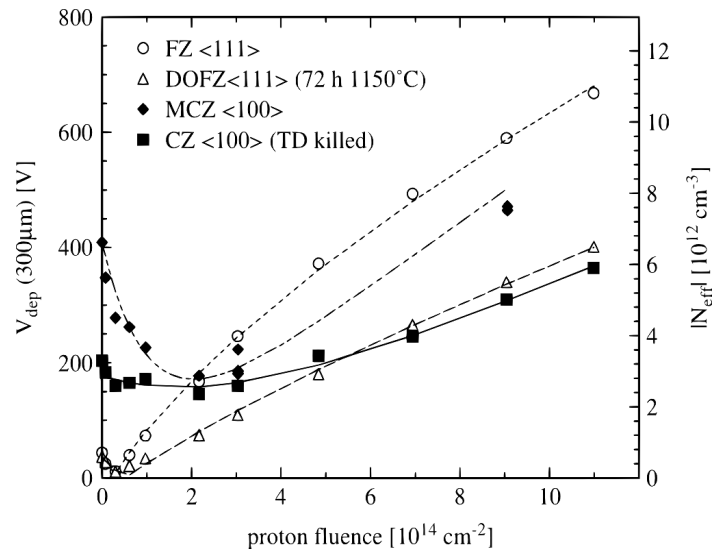


Abbildung 2.13: Abhängigkeit der Verarmungsspannung vom Strahlenfluß für verschiedene Siliziumsubstrate; StFz - Standard Float-Zone-Silizium (FZ), DoFz - Sauerstoffangereichertes FZ, Magnetic-Czochralski-Silizium (MCz), Epitaktisches Silizium (Epi); [121, Fig.3]

Strahlungshärte von Polysilizium

Untersuchungen zur Strahlungshärte von Polysilizium zeigen keine Veränderung des spezifischen Widerstandes bei Gamma-Bestrahlung (Co-60) bis zu einer Dosis von einem Kilogray. Nach Neutronenbestrahlung wurde ein leichter Anstieg des Widerstandes bei Dosen größer 10^{15} cm^{-2} 1 MeV Neutronäquivalenten berichtet [11]. Auch bei Alpha-, Beta- und Protonenbestrahlung gibt es einen Anstieg des Widerstandes durch Bestrahlung [126].

Strahlungshärte der Sensoren im CMS-Detektor

Zur Überwachung der Strahlungsschäden der verwendeten Pixelsensoren im CMS-Spurdetektor, wird kontinuierlich der Dunkelstrom gemessen und die Verarmungsspannung bestimmt. Die Messungen des Dunkelstromes stimmen sehr gut mit dem vorhergesagten Verhalten überein. Die Ladungssammeleffizienz der Sensoren in Abhängigkeit der Verarmungsspannung ist in Abbildung 2.14 für verschiedene integrierte Luminositäten dargestellt. Durch die im Detektor auftretende Strahlung sinkt die Spannung, bei der eine volle Effizienz erreicht wird. Dieses wird für n-in-n Sensoren durch den Effekt der Typumwandlung zunächst erwartet.

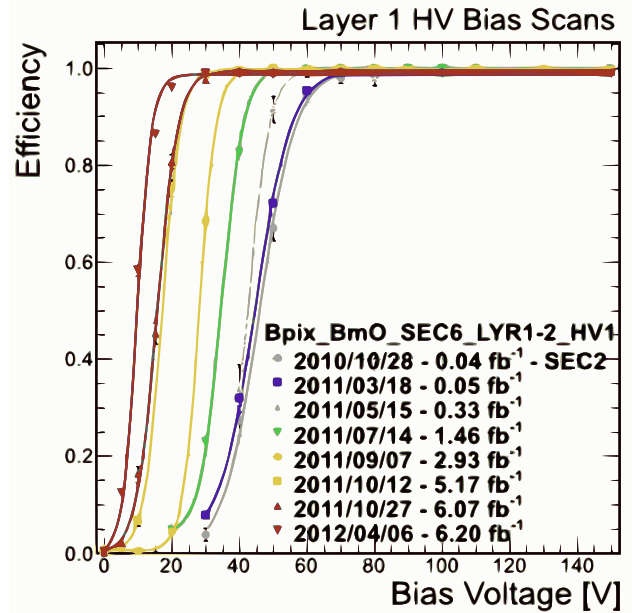


Abbildung 2.14: Pixeleffektivität als Funktion der Betriebsspannung für verschiedene integrierte Luminositäten; [16, Folie 14]

2.4 Siliziumsensoren

2.4.1 Grundlegende Funktionsweise

Energieverlust von Teilchen in Materie

Die Energieabgabe eines ionisierenden Teilchens in Materie wird durch die **Bethe-Bloch-Gleichung** beschrieben [21] ,

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \frac{z^2 Z}{A\beta^2} \left[\underbrace{\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 T_{max}}{E_{ex} (1 - \beta^2)} \right)}_{\text{Energieübertrag}} - \beta^2 - \underbrace{\delta(\beta\gamma)}_{\text{Dichtekorrektur}} - \underbrace{\frac{C}{Z}}_{\text{Schalenkorrektur}} \right] \left[\frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2} \right]. \quad (2.26)$$

Hier sind A die Atommasse des durchdrungenen Materials, $\beta = v/c$ die Relativgeschwindigkeit des durchdringenden Teilchens, c die Lichtgeschwindigkeit, C/Z eine Grösse, die eine Korrektur für kleine β berücksichtigt, die aus dem Einfluß der Elektronenbindungen an den Kernen entsteht [5]. Desweiteren sind $\delta(\beta\gamma)$ der Dichtekorrekturfaktor für sehr große Energien [141], E_{ex} die mittlere Anregungsenergie für Ionisationen, m_e die Elektronmasse, N_A die Avogadro-Konstante, r_e der klassische Elektronradius, $T_{max} = 2m_e c^2 \beta^2 / (1 - \beta^2)$ der maximale Energieübertrag pro Stoß, z die Ladung des durchdringenden Teilchens und Z die Ordnungszahl des durchdrungenen Materials.

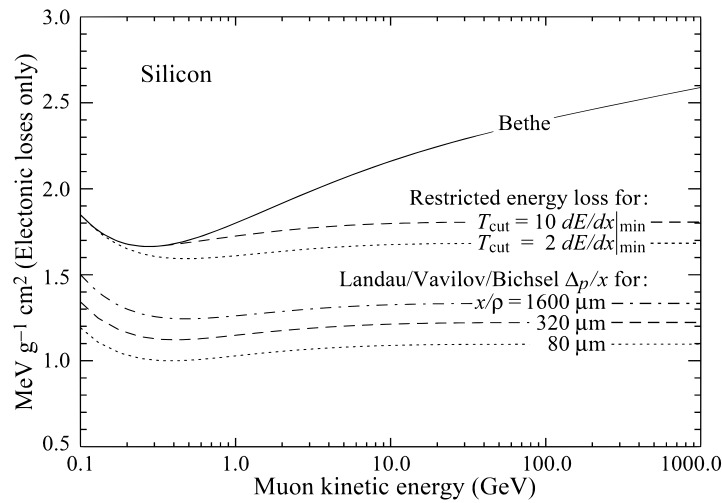


Abbildung 2.15: **Abhängigkeit des Energieverlustes von Myonen in Silizium von der kinetischen Energie;** [21, Figure 30.6]

Die Energieabgabe von Myonen in Silizium ist in der Abbildung 2.15 dargestellt. Im nicht relativistischen Bereich fällt der Energieverlust zunächst mit $1/\beta^2$ und erreicht ein Minimum beim etwa dreifachen der Ruhemasse des Teilchens bzw. bei $\gamma \cdot \beta \approx 3$. Der Energieverlust ist für alle Teilchen mit dieser Energie etwa gleich $-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \approx 2 \frac{\text{MeV}}{\text{g} \cdot \text{cm}^2}$. Daher werden Teilchen mit dieser Energie zusammenfassend als **Minimum Ionizing Particle (MIP)**-Teilchen bezeichnet. Jeder Sensor muss folglich so dimensioniert sein, dass er diese Teilchen erfassen kann.

Funktionsprinzip eines Siliziumsensors

Ein Siliziumsensor ist im Grundprinzip vereinfacht eine in Sperrrichtung betriebene, segmentierte Diode. Ein ionisierendes Teilchen erzeugt beim Durchdringen des Sensors Ladungen welche durch das elektrische Feld separiert werden.

In Silizium beträgt die durchschnittliche Energie für die Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren 3,6 eV und führt bei einem minimalen Energieverlust von 390 eV/ μm zur Erzeugung von 108 Elektron-Loch-Paaren pro Mikrometer Sensordicke. Für einen Sensor mit einer Dicke von 320 μm ergibt sich daraus eine Signalladung von 35000 Elektron-Loch-Paaren für ein MIP-Teilchen. Die Verteilung des Energieverlustes von durchdringenden Teilchen ist aufgrund von statistischen Stoßprozessen eine Landau-Verteilung [98] mit einem wahrscheinlichsten Wert von 25000 Elektron-Loch-Paaren [76]. Wie Abbildung 2.16 zeigt, verteilt sich die Ladung auf mehrere Sensorzellen. Durch Ladungseinfang an Defekten geht ein Teil der erzeugten Ladung als Signal verloren.

Die erreichbare Ortsauflösung Δx hängt vom Rasterabstand P ab $\Delta x = \frac{P}{\sqrt{12}}$. Durch die Eta-Funktion kann die erreichbare Ortsauflösung verbessert werden. Die Eta-Funktion ist die gewichtete Ladung des linken (L) und rechten (R) Sensorelements [147]

$$\eta = \frac{x_R \cdot Q_R + x_L \cdot Q_L}{Q_R + Q_L}. \quad (2.27)$$

Die Position des Teilchendurchganges kann nun mittels der Eta-Funktion berechnet werden $x = x_L + P \cdot \eta$.

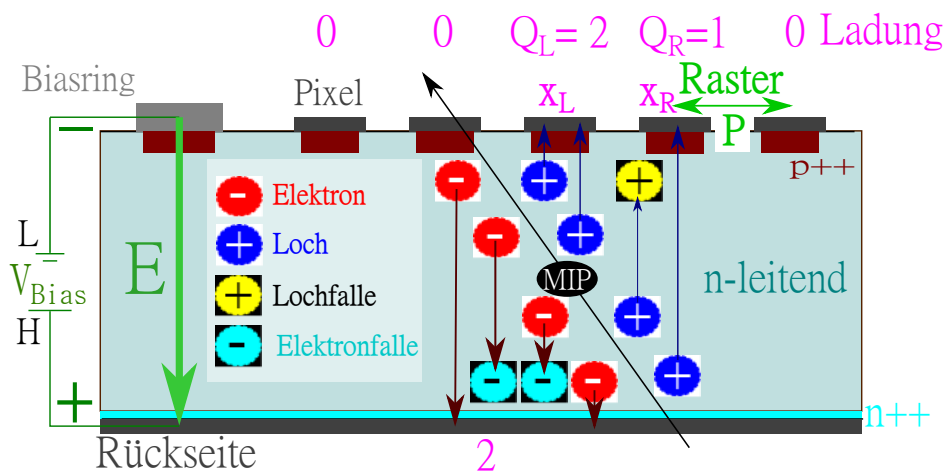


Abbildung 2.16: **Funktionsprinzip eines p-in-n-Sensors.** Durch eine Spannung, V_{Bias} , werden die durch ein MIP-Teilchen erzeugten Elektronen und Löcher separiert und wandern entlang des elektrischen Feldes E zu den Kontakten. Dabei können sie von Ladungsfallen eingefangen werden. An der Sensoroberfläche wird in den Sensorelementen $X_{L/R}$ eine Signalladung $Q_{L/R}$ gemessen; Frei nach [76, Fig. 1.16]

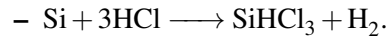
2.4.2 Herstellung von Siliziumwafern

Silizium ist mit einem Anteil von 26 Prozent das zweithäufigste Element der Erdkruste und kommt überwiegend in Silikat- und Quarzverbindungen vor. Aufgrund der extremen Reinheitsanforderungen ist nur ein kleiner Teil für die technische Nutzung verwendbar [37]. Das Siliziumquarz wird in mehreren Schritten zu reinem Silizium prozessiert [143, 76]. Die Hauptschritte sind [37]:

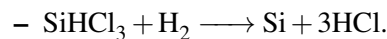
- Die Reduktion von Siliziumdioxid mit Kohlenstoff, bei der folgende Prozesse ablaufen
 - $\text{SiO}_2 + 3\text{C} \longrightarrow \text{SiC} + 2\text{CO},$
 - $2\text{SiC} + \text{SiO}_2 \longrightarrow 3\text{Si} + 2\text{CO}.$

KAPITEL 2. HALBLEITER, SILIZIUM UND SILIZIUMSENSOREN

- Anschließend wird das Rohsilizium pulverisiert und mit Chlorwasserstoff zu dem gasförmigen Trichlorsilan umgewandelt:



- Das Trichlorsilan wird destilliert, mit Wasserstoff zur Reaktion gebracht und Silizium abgeschieden



Das entstandene Siliziumpulver hat eine Reinheit von 99,999999999% (engl. *eleven nines*). Nun wird über verschiedene Herstellungsverfahren der einkristalline Siliziumwafer hergestellt.

Je nach Herstellungsverfahren hat das Silizium eine charakteristische Sauerstoff- und Kohlenstoffkonzentration. Eine Liste der typischen Verunreinigungskonzentrationen befindet sich in Tabelle 2.4.

Substrat	Abkürzung	Konzentration [cm^{-3}]	
		O	C
Float-Zone-Silizium	StFZ	$< 5 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{15}$
Sauerstoff angereichertes FZ	DoFZ	$1 \dots 2 \cdot 10^{17}$	$5 \cdot 10^{15}$
Czochralski Silizium	Cz	$8 \dots 9 \cdot 10^{17}$	$5 \cdot 10^{15}$
Magnetic-Czochralski-Silizium	MCz	$4 \dots 5 \cdot 10^{17}$	$< 1 \cdot 10^{16}$
Epitaktisches Silizium	Epi	$1 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{15}$

Tabelle 2.4: Sauerstoff(O)- und Kohlenstoff(C)-konzentration für verschiedene Siliziumsubstrate; [28, 108]

Float-Zone Silizium

Beim Float-Zone (FZ) Verfahren wird ein polykristalliner Ausgangskristall durch eine Induktionsspule schrittweise aufgeschmolzen [116]. Zuerst wird eine Seite des Kristalls geschmolzen und ein einkristalliner Startkristall benutzt, um die Kristallorientierung der Rekristallisation festzulegen. Wie in Abbildung 2.17 gezeigt, wird anschließend die Induktionsspule über den gesamten Bereich des Ausgangskristalls verfahren. Dotierungen werden aus der Gasphase, z.B. B_2H_6 oder PH_3 , in die geschmolzene Zone eindiffundiert.

Da bei diesem Verfahren kein Tiegel verwendet wird, aus dem Verunreinigungen in das Silizium diffundieren können, werden besonders reine Siliziumkristalle hergestellt. Da die Löslichkeit der meisten Verunreinigungen in der flüssigen Phase höher als in der festen Phase ist, kommt es zu einer Anreicherung von Fremdatomen in der flüssigen Phase. Durch das schrittweise Aufschmelzen wandern die Verschmutzungen mit der flüssigen Phase in Richtung Kristallende.

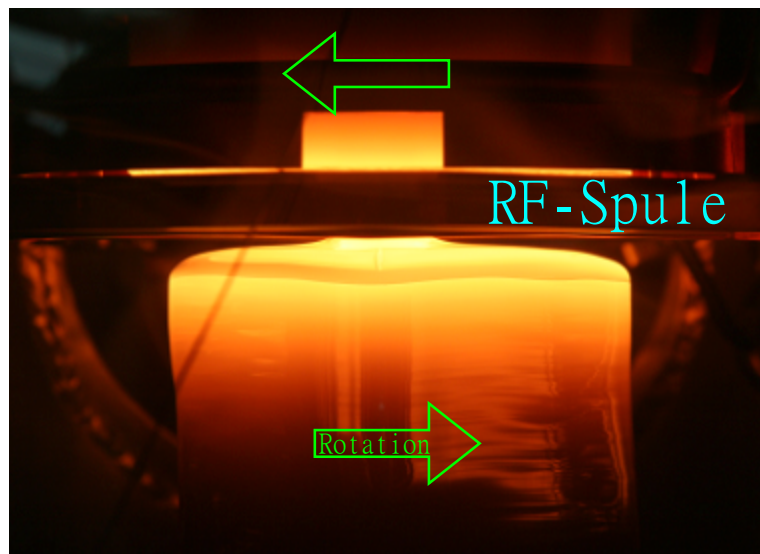


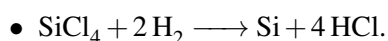
Abbildung 2.17: **Fotografie des Aufbau des Float-Zone-Verfahren;** [67, Fig.3.1]

Magnetic-Czochralski-Silizium

Für die Herstellung von Magnetic-Czochralski-Silizium (MCz) wird Silizium zusammen mit den Dotieratomen in einem Tiegel geschmolzen [142]. Anschließend wird ein einkristalliner Startkristall in die Schmelze getaucht und unter Rotation mit einer Geschwindigkeit von einigen Millimetern pro Minute aus dieser gezogen. Dabei kristallisiert das Silizium entlang der Zugrichtung mit der Kristallorientierung des Startkristalls. Über die Zug- und Rotationsgeschwindigkeit kann der Kristalldurchmesser mit einer Genauigkeit von einigen Millimetern beeinflusst werden [61]. Durch Anlegen eines Magnetfeldes kann das konvektive Strömungsverhalten, der sich in der Schmelze befindlichen Ionen, verringert und der Einbau von Sauerstoffionen aus der Tiegelwand unterdrückt werden [101].

Epitaktischen Silizium

Epitaktisches Silizium wird durch schichtweises Abscheiden aus der Gasphase hergestellt. Bei diesem Verfahren wird Siliziumtetrachlorid mit Wasserstoff bei etwa 1200 °C zur Reaktion gebracht und Silizium scheidet sich auf dem polykristallinen Siliziumsubstrat ab [143].



Das Dotieren geschieht wie beim Float-Zone-Silizium-Verfahren aus der Gasphase, wobei die Dotierungskonzentration von der Wachstumsgeschwindigkeit abhängt und sehr genau gesteuert werden kann.

2.4.3 Vom Wafer zum Sensor

Nach dem Wachstum wird der Einkristall in Wafer geschnitten. Auf den Wafern werden die Sensoren prozessiert [92]. Die Herstellungsverfahren sind dieselben wie in der Chipindustrie, wobei sich die Herstellungsdetails je nach Produzent unterscheiden. Zunächst wird der Wafer auf die gewünschte Sensordicke gebracht. Dieses kann durch physikalische Dünungsverfahren, wie dem Waferätzen erreicht werden, oder durch den neuartigen Prozess der „Deep diffusion“, bei dem die aktive Sensordicke durch eine Diffusion von Dotieratomen an der Sensorrückseite eines dickeren Wafers eingestellt wird.

Prozessschritte

Die wichtigsten Prozessschritte für die Sensorherstellung sind in der Abbildung 2.18 illustriert [76, 143]:

1. Das Silizium wird unter einer Sauerstoffatmosphäre erhitzt und oxidiert.
2. Für die Sensorelemente werden Öffnungen lithographiert und geätzt.
3. Die Dotierungen werden auf der Ober- und Unterseite eingebracht¹
4. Überschüssige Dotieratome werden entfernt und das Dotierungsprofil wird über eine thermisch ausgelöste Diffusion erzeugt.
5. Die Oberflächenmetallisierung wird aufgedampft.
6. Das überschüssige Metall wird entfernt.
7. Zum Schluß wird die Rückseitenmetallisierung aufgedampft.

Zwischen den Prozessschritten finden Erwärmungsphasen zur Defektausheilung statt [53]. Weiterführende Informationen können aus der Arbeit von W. Treberspurg [146] entnommen werden.

2.4.4 Sensoraufbau

Der prinzipielle Aufbau eines p-in-n Siliziumsensors ist in Abbildung 2.19 gezeigt. Bei einem n-in-p Sensor werden die Dotierungstypen vertauscht, bei einem n-in-n Sensor sind die p^+ -Bereiche durch hochdotierte n-leitende Bereiche ersetzt. Bestandteile eines p-in-n Sensor sind:

- Der **Sensorkörper** (engl. *bulk*), der das Detektionsvolumen bildet. Dieser ist schwach dotiert und hat typischer Weise einen spezifischen Widerstand von einigen Kiloohm je Zentimeter.

¹Beim „deep diffusion“-Prozess werden die Rückseitendotierung schon vor dem ersten Prozessschritt eingebracht.

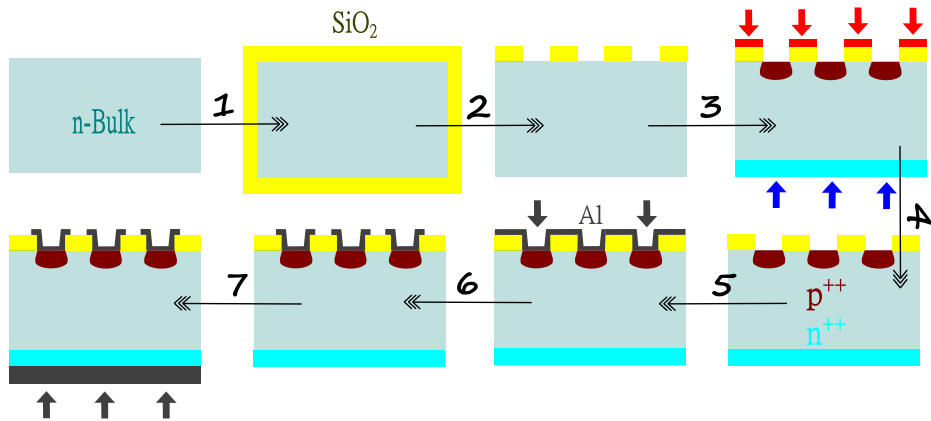


Abbildung 2.18: **Die Herstellungsschritte von Siliziumsensoren**; Frei nach [22, Figure2.4]

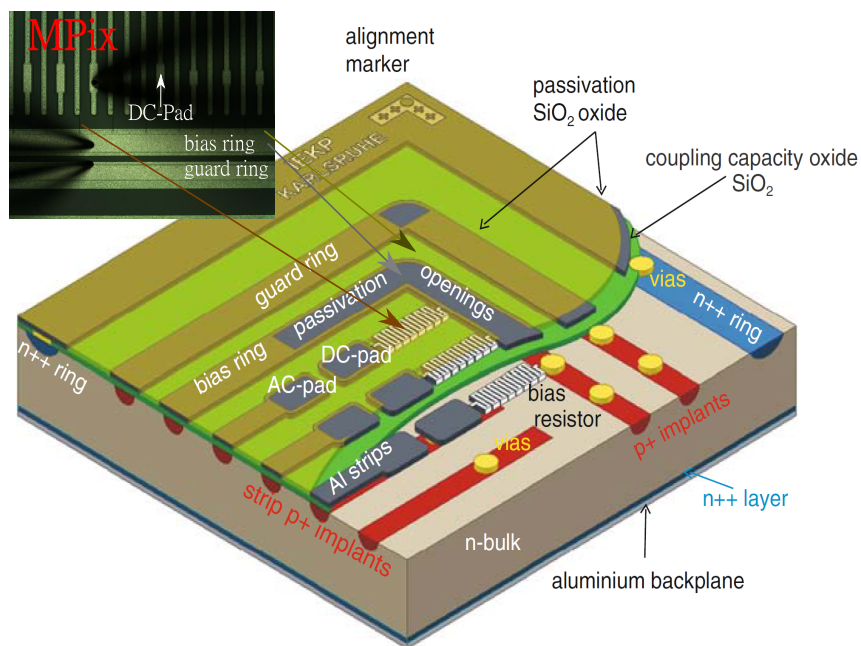


Abbildung 2.19: **Aufbau eines p-in-n Streifensensors**. Details zu den Sensorbestandteilen sind im Text gegeben. Das Foto zeigt einen MPix-Sensor, auf dem die Sensorbestandteile markiert sind; [76, Fig.1.19]

- Die **Sensorrückseite** (engl. *back plane*), welche zur elektrischen Kontaktierung metallisiert ist. Zur Verhinderung eines Schottky-Kontaktes wird die Rückseite ebenfalls höher dotiert ($\sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$).
- Die **Sensorelemente** welche zur Erhöhung der Ortsauflösung segmentiert sind. Üblich sind quadratische Pixel oder Streifen. Die Elemente bestehen aus einem, etwa einen Mikrometer tiefen, hochdotierten (10^{19} cm^{-3}) p-leitenden Bereich. Wichtige Kenngrößen der Segmente sind das **Raster P** (engl. *pitch*), die **Segmentbreite** w und die **Segmentlänge** L .
 - Die Sensorelemente können über eine Oberflächenmetallisierung ausgelesen werden, im weiteren „**DC-Pad**“ genannt. Um die Spannungsfestigkeit zu erhöhen ist die Metallisierung breiter als die dotierten Bereiche (engl. *metal overhang*) [6]. Auf dem DC-Pad wird eine Isolationsschicht aus Siliziumoxid und Siliziumnitrid aufgebracht. Diese Schicht wird metallisiert und die im Metall erzeugten Spiegelladungen werden ausgelesen, im weiteren „**AC-Pad**“ genannt.
- Der **Biasring** dient zur Kontaktierung des Massepotentials und bildet für alle Sensorelemente ein gemeinsames Bezugspotential. Der **Biasring** besteht, wie die Sensorelemente, aus einem hochdotierten p-leitenden Bereich.
- Die **Bias-Struktur** verbindet alle Sensorelemente mit dem **Biasring**. Wird das Signal am AC-Pad ausgelesen, werden durch den **Biasring** die Signalladungen abgeleitet. Die Bias-Struktur wird entweder als Polysiliziumwiderstand, Seite 29, oder als *Punch-Through-Struktur*, Seite 45, realisiert.
- Der **Schutzring** (engl. *guard ring*), der die aktive Sensorfläche umgibt und das Feld innerhalb dieser homogenisiert. Zusätzlich dient er zum Ableiten von parasitären Strömen aus den inaktiven Sensorbereichen. Der Schutzring kann aktiv auf Masse gelegt oder passiv sein.

Bei der passiven Variante wird das Potential über mehrere Ringe gestaffelt abgebaut, was zu einem höheren Flächenverbrauch führt, aber keinen zusätzlichen Strom generiert.
- Die **Sensorkante** ist hoch n-leitend dotiert, um die beim Sensorschneiden entstandenen Defekte auszugleichen.
- Die **Sensoroberfläche** ist mit einer Siliziumoxidschicht passiviert um die Diffusion von Fremdatomen in das aktive Volumen zu verhindern.
- **Sensorelementisolation**. Für p-leitende Sensoren müssen die Streifen voneinander isoliert werden, siehe Seite 46

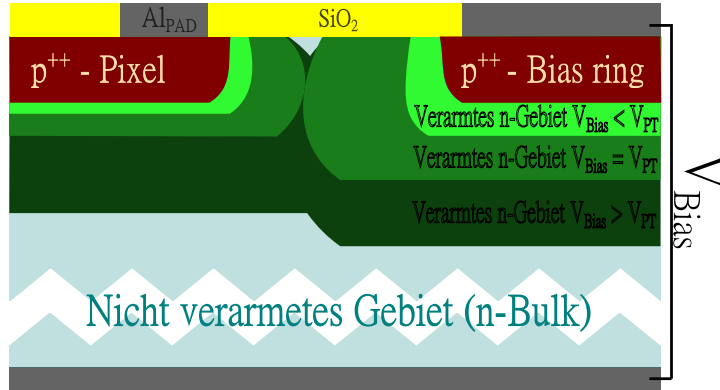


Abbildung 2.20: **Funktionsprinzip der Punch-Through-Struktur**
Frei nach [96, page7]

Punch-Through-Struktur

Der Vorteil bei der Verwendung von *Punch-Through-Strukturen* im Vergleich zu Polysiliziumwiderständen liegt darin, dass bei Herstellung der Polysiliziummaskenschritt eingespart wird.

Durch eine Spannung V_{Bias} an der Sensorrückseite vergrößern sich die verarmten Gebiete unter den Sensorelementen und dem *Biasring* entsprechend der Formel 2.16. Wie Abbildung 2.20 zeigt, vereinen sich bei der **Punch-Through-Spannung** V_{PT} beide Zonen. Dadurch gleicht sich das Potential des Sensorelements und des *Biasrings* an. Die *Punch-Through-Spannung* hängt von der Sensorkörperdotierung, dem Abstand zwischen *Biasring* und Sensorelement, der Oxidladung Q_{ox} , dem Dunkelstrom des Sensorelementes und der Kontaktgeometrie ab [153, 58]. Idealisiert kann eine *Punch-Through-Struktur* als p^+np^+ -Bipolar-Transistor mit potentialfreier Basis betrachtet werden [111, 36].

In diesem Modell gibt es zwei pn-Übergänge, von denen durch eine Collector-Emitter-Spannung V_{CE} je einer in Durchlass- und einer in Sperrrichtung betrieben wird.

Solange die Spannung kleiner als die *Punch-Through-Spannung* ist, ist der zwischen Collector und Emitter fließende Strom klein,

$$I(V_{\text{CE}}) = \frac{en_i}{\tau_n} (W_1 + W_2) , \quad (2.28)$$

mit der effektiven Lebensdauer τ_n und den Sperrschichtweiten $W_{1/2}$. Für eine höhere Spannung als die *Punch-Through-Spannung* fließt ein Strom von dem p-leitenden Bereich in den n-leitenden Bereich,

$$I_{p^+ \rightarrow n}(V_{\text{CE}}) = A^* T^2 \exp \left(-\frac{e(V_{\text{FB}} - V_{\text{CE}})}{4k_B T \cdot V_{\text{FB}}} \right) , \quad (2.29)$$

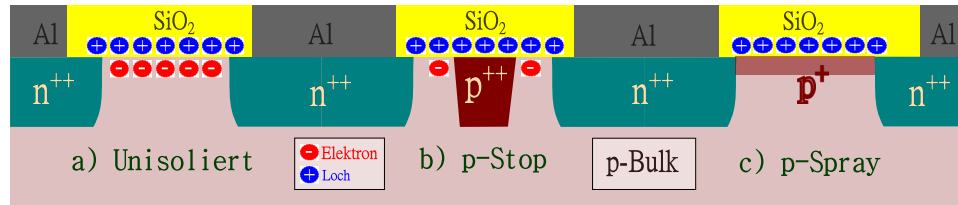


Abbildung 2.21: **Isolationstechniken für p-leitende Sensoren** (a) Ausbildung eines leitenden Kanals für nicht isolierte Streifen. (b) **p-Stop** Isolation, bestehend aus einem hochdotierten (10^{16} cm^{-3}), nicht kontaktierten p-leitenden Bereich zwischen den Sensorelementen. (c) **p-Spray** Isolation, bestehend aus einem niedrig dotierten (10^{14} cm^{-3}) p^+ -Bereich zwischen den Sensorelementen

mit der effektiven Richardson-Konstante A^* und der Flachbandspannung V_{FB} , die vom Abstand P und der Dotierungskonzentration n_D abhängt,

$$V_{FB} = (en_D/2\epsilon_r)/P^2. \quad (2.30)$$

Durch Ableitung von Formel 2.29 erhält man den differentiellen Widerstand:

$$dR = \frac{dV}{dI} = \left[\left(\frac{eA^*T(V_{FB} - V_{CE})}{2k_B V_{FB}} \right) \exp \left(-\frac{e(V_{FB} - V_{CE})}{4k_B T \cdot V_{FB}} \right) \right]^{-1} \quad (2.31)$$

Isolationen

Durch ungesättigte Bindungen entstehen an der Silizium- / Siliziumoxidgrenzfläche Energieniveaus, die innerhalb der Bandlücke von Silizium liegen [144]. Dissoziieren diese Zustände, können die Elektronen über das Silizium abgeleitet werden, und es bleiben ortsfeste, positive Ladungen zurück Q_{Ox} . Die Ladungskonzentration liegt in der Größenordnung von 10^{10} cm^{-3} . Diese Ladungen erzeugen eine negative Spiegelladung im Silizium, wodurch dieser Bereich nicht verarmt werden kann und sich ein leitender Kanal zwischen den Streifen ausbildet [97], wie in Abbildung 2.21a gezeigt wird. Zur Verhinderung der Kanalbildung werden Isolationsstrukturen verwendet [148]. Dabei wird entweder ein hochdotierter p-leitender Bereich zwischen den Streifen eindiffundiert, sodass sich kein leitender Kanal ausbilden kann, „**p-Stop**“, oder es wird die Oberflächenschicht höher dotiert, sodass sich keine Spiegelladungen bilden können, „**p-Spray**“.

2.4.5 Sensorkenngrößen und ihre Bedeutung für den Sensorbetrieb

Wichtige Kenngrößen eines Sensors sind in der Abbildung 2.22 zusammengefasst [76]. Dazu gehören:

- Der **Dunkelstrom**, I_{Bias} , I_{Pixel} und I_{Guard} , ist der Strom, der ohne Signalladung bei der Spannung V_{Bias} von der Sensorrückseite zum entsprechenden Sensorbestandteil fließt. Zur Begrenzung der Leistungsaufnahme muss der Dunkelstrom möglichst klein sein.

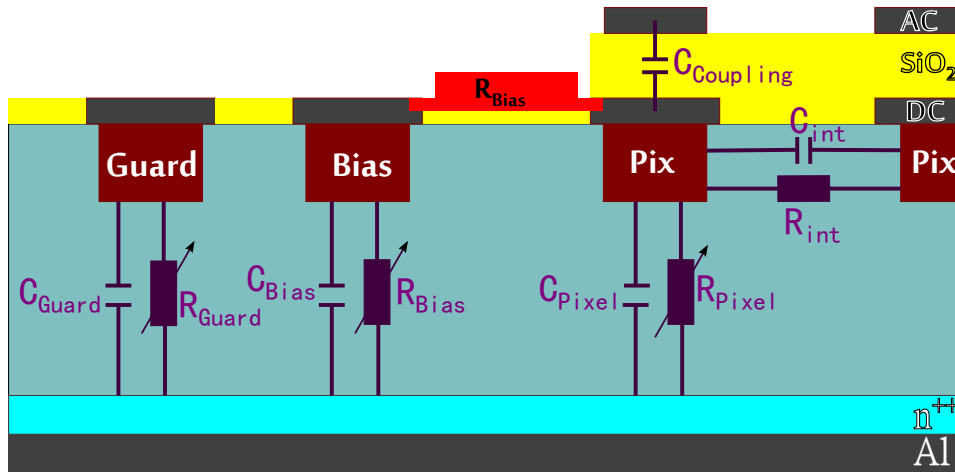


Abbildung 2.22: Darstellung der wichtigsten Sensorkenngrößen

- Die **Verarmungsspannung**, V_{Depl} , ist die Spannung, ab der der gesamte Sensor verarmt ist und dadurch die minimale Spannung, bei der der Sensor die volle Ladungssammelleffizienz erreicht. Für eine schnellere Ladungssammlung durch ein nicht verschwindendes Feld an der Sensorrückseite werden die Sensoren üblicherweise mit höheren Spannungen betrieben „*over-depletion*“ [152].
 - Die Verarmungsspannung eines Sensors ist eine Funktion der Sensordicke d , des Rasters P und des Pixelbreite w [25]:

$$V_{Depl} = \frac{e \cdot N_{eff}}{2\epsilon_0\epsilon_r} \left[d^2 + 2Pd \cdot f\left(\frac{w}{P}\right) \right] \left[\frac{pF}{cm} \right] \quad (2.32)$$

wobei die Funktion $f\left(\frac{w}{P}\right)$ wie folgt parametrisiert wird

$$f\left(\frac{w}{P}\right) = -0,0011 \left(\frac{w}{P}\right)^{-2} + 0,059 \left(\frac{w}{P}\right)^{-1} + 0,24 - 0,65 \frac{w}{P} + 0,36 \left(\frac{w}{P}\right)^2 \quad (2.33)$$

- Die **Durchbruchsspannung**, V_{Break} , ist die Spannung ab der es zu den auf der Seite 24 beschriebenen Durchbrüchen kommt. Der Bereich des Durchbruchs ist bei Siliziumsensoren, aufgrund der höheren Defektdichte, bevorzugt an der Silizium- / Siliziumoxidgrenzfläche [88]. In diesem Bereich treten die Durchbrüche bei Feldstärken weit unterhalb der intrinsischen Feldstärke von Silizium auf.
Die Durchbruchsspannung stellt die obere Grenze der Spannung V_{Bias} dar.

- Die **Koppelkapazität**, $C_{Coupling}$, zwischen dem AC- und dem DC-Pad sollte groß sein, um eine möglichst hohe Spiegelladung zu erzeugen. Die Dicke der Isolationsschicht zwischen beiden Anschlußlagen muss aber dick genug sein, um beide Pads voneinander zu isolieren.
- Die **Zwischenpixelkapazität**, C_{int} , ist die Kapazität zwischen zwei Sensorelementen. C_{int} muss eine Mindestgröße erreichen, um eine Ladungsteilung zwischen den Sensorelementen zu ermöglichen, aus der die Position des Teilchendurchgangs berechnet werden kann [76]. Andererseits darf sie nicht zu groß sein, damit der Großteil der Signalladung ausgelesen werden kann. Aus diesen Randbedingungen ergeben sich typische Werte von 1 pF/cm.

- Die Zwischenpixelkapazität pro Einheitslänge ist für das Raster P und der Sensorelementbreite w [6]:

$$C_{int} = (0,1 + 1,5(w + 20 \mu m) / P) \left[\frac{pF}{cm} \right] \quad (2.34)$$

- Die **Rückseitenkapazität**, C_{Pixel} , C_{Bias} , oder C_{Guard} , ist die Kapazität des Sensorelements zur Sensorrückseite:
 - Die Rückseitenkapazität eines Sensorelements pro Einheitslänge hängt von der Sensordicke d, dem Raster P und der Sensorelementbreite w ab [25]

$$C_{Pixel} = \left(\epsilon_0 \epsilon_r \frac{P}{d + P \cdot f\left(\frac{w}{P}\right)} \right) \left[\frac{pF}{cm} \right] \quad (2.35)$$

wobei $f(w/P)$ in Gleichung 2.33 eingeführt wurde.

- Die **Bias-Struktur** R_{Bias} ist eine der Haupterschließungsstellen [76]. Eine typische Größe eines Polysiliziumwiderstands R_{Poly} ist einige Megaohm mit einer Variation von ein paar hundert Kiloohm auf einen Sensor.
- Die **Zwischenpixelisolation** R_{int} muss möglichst groß ($> 1 G\Omega$) sein, um die Sensorelemente voneinander zu isolieren, darf aber auch nicht zu groß werden, um eine Ladungsteilung auf die Sensorelemente zu ermöglichen.

Kapitel 3

Die HPK-Kampagne

3.1 Zukünftige Sensoren für den CMS-Spurdetektor

Um unabhängig vom Herstellungsprozess der Sensorproduzenten zu sein und die maximale Vergleichbarkeit zu erlangen, wurden alle Sensoren von einem Unternehmen, der Hamamatsu Photonics K.K. (HPK), produziert [79, 22].

Aufgrund der im Kapitel 2.3.1 beschriebenen Unterschiede bei der Strahlenhärte, wurden unterschiedliche Substrate (Epitaktisches Silizium, Float-Zone-Silizium und Magnetic-Czochralski-Silizium), mit jeweils verschiedenen Dicken untersucht. Zusätzlich werden unterschiedliche Technologien (n-in-p oder p-in-n) und Isolationsmechanismen (p-Stop oder p-Spray) erprobt. Auch werden verschiedene Sensorlayouts und *Bias-Strukturen* getestet. Eine Übersicht aller untersuchten Materialien befindet sich in der Tabelle 3.1 und eine Auflistung der wichtigsten Teststrukturen in der Tabelle 3.2.

3.1.1 Erwartete Strahlendosis

Um die zukünftige Strahlendosis am LHC abschätzen zu können, wurden Simulationen durchgeführt [83]. Dabei wurde nicht nur der Teilchenfluss, sondern auch die Teilchenzusammensetzung und Energieverteilung in Abhängigkeit von der Kollisionsschwerpunktenergie und der Luminosität berechnet.

Eine Darstellung des erwarteten Strahlenflusses für einen zehnjährigen Betrieb in Neutronäquivalenten n_{eq} , wie auf Seite 31 eingeführt, ist in Abbildung 3.1b als Funktion des Radius gezeigt. Für einen Radius von 20 cm wird ein Fluss von $8,9 \cdot 10^{14} n_{eq}$ Protonen und $5 \cdot 10^{14} n_{eq}$ Neutronen berechnet.

3.1.2 Kampagnenverlauf

Zuerst wurden von den unbestrahlten Sensoren die elektrischen Eigenschaften gemessen. Dabei wurden für alle Float-Zone- und Magnetic-Czochralski Siliziumsensorentypen mindestens zwei Sensoren und für alle epitaktischen Sensortypen je ein Sensor gemessen.

Label	Substrat	aktive Dicke [μm]	Produktionstechnologie			Farbcode
			p-in-n	n-in-p (p-Stop)	n-in-p (p-Spray)	
FZ320	FZ	320	3	4	3	Schwarz
FZ200	FZ	200	2	3	4	Rot
FZ120	FZ	120	3	2	2	Blau
M200	MCz	200	4	3	3	Grün
E100	Epi	100	1	1	1	Violet
E50	Epi	50	1	1	1	Rosa

Tabelle 3.1: Anzahl der MPix-Sensoren, die für den jeweiligen Sensortyp vor Bestrahlung untersucht wurden. Untersucht wurden Float-Zone-Silizium (FZ), Magnetic-Czochralski-Silizium (MCz) und Epitaktisches Silizium (Epi). Der Farbcode bezieht sich auf die Darstellungen innerhalb dieser Arbeit

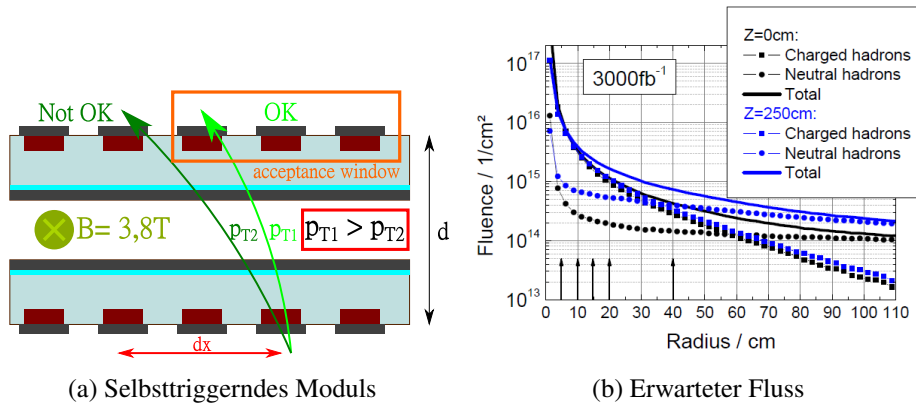


Abbildung 3.1: (a) Es ist das Funktionsprinzip des geplanten selbsttriggernden Moduls gezeigt. Für die Teilchenselektion wird genutzt, dass die Teilchen abhängig von ihrem Impuls p unterschiedlich stark vom Magnetfeld B abgelenkt werden. (b) Erwarteter Teilchenfluss in Abhängigkeit vom Radius im Barrel ($Z=0\text{ cm}$) und in den Endkappen ($Z=250\text{ cm}$) für verschiedene Teilchenarten im CMS Detektor nach der dritten Upgradephase. Der Teilchenfluss ist für eine Schwerpunktenenergie von 14 TeV und eine Gesamtluminosität von 3000 fb^{-1} berechnet. Die Pfeile kennzeichnen die Positionen der Sensorlagen.

Quelle: [48, Figure1]

Strukturname	Aufgabe und Funktion
Multi-Geometry-SSD	Geometrie- & Dickestudien
Multi-Geometry-Pixel	Geometrie- & Dickestudien
BPix-/FPix-Pixelsensor	Strahlungsharter, planer Pixelsensor
Baby_STD	Bestrahlungs- & Annealingstudien
Baby_PA	Streifensensor mit integriertem Pitchadapter
Baby_Strixel	Designstudie für Pixellayout
ADD_Baby	Lorentzwinkelmessungen
Dioden	Bestrahlungs-, Annealing- & Materialstudien
Halfmoon	Design-, Prozeß- & Oberflächenstudien
Hall-Sensors	Hall-Effektmessungen

Tabelle 3.2: Übersicht der wichtigsten Teststrukturen der HPK-Kampagne und ihre Funktion

Im Anschluß wurde je ein Sensor von acht ausgewählten Sensortypen (FZ320P, FZ320Y, FZ320N, FZ200P, FZ200Y, M200P, M200Y, M200N) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) mit 25 MeV-Protonen bestrahlt. Nach der Protonenbestrahlung wurden die Sensoren an der Ljubljana Neutron Irradiation Facility [136] mit Neutronen bestrahlt. Der Gesamtfluss entspricht in Anzahl und Proton- zu Neutronverhältnis den Erwartungen für einen Abstand von 20 cm vom Wechselwirkungspunkt senkrecht zur Strahlachse im CMS-Experiment am zukünftigen LHC-Beschleuniger.

Um die auf Seite 31 eingeführten Annealing-Prozesse zu unterdrücken werden die Sensoren dauerhaft bei -20 °C aufbewahrt. Auch während des Transportes wurden die Sensoren mit Eis gekühlt ($T \leq 0\text{ °C}$).

3.1.3 Waferlayout und Teststrukturen

Zur Untersuchung wurden 28 verschiedene Teststrukturen hergestellt. Grundlegende Strukturen wie Dioden dienen zur Untersuchung der Strahlenhärte des Substrats. An Sensoren mit verschiedenen Layouts, wie die sogenannten „Multi-geometry pixel-“, „Multi-geometry strips-“ oder „Baby-Strixel“-Sensoren, wird die optimale Sensorgeometrie getestet. Vor der Fertigung wurden grundlegende Sensorenspezifikationen festgelegt[50], wie in Tabelle 3.3 zusammengestellt.

3.1.4 Multi-geometry Pixelsensoren

In der vorliegenden Arbeit wurde aus der HPK-Kampagne der **MPix-Sensor** untersucht. Mit den MPix-Sensoren wird der Einfluß der *Bias-Strukturen* auf die Strahlenhärte untersucht.

Größe	Wert
Substrat	
Substratleitfähigkeit	n-type FZ : 1,2 ... 2,4 kΩcm n-type MCz : > 0,5 kΩcm p-type FZ: 3 ... 8 kΩcm p-type MCz : > 2 kΩcm
Elektrische Eigenschaften	
Polysiliziumwiderstand	>2 MΩ; <±0,3 MΩ pro Sensor
Verarmungsspannung (unbestrahlt)	<200/400 V für Epi- bzw. FZ-/MCz-Si
Dunkelstrom	<50 μA (unbestrahlt) / <1 mA (bestrahlt)
Spannungsfestigkeit (bestrahlt)	>200/500 V für Epi- bzw. FZ-/MCz-Si
Kapazitätsverhalten	<10 % Anstieg nach Bestrahlung
Pixelisolation	>1 GΩ@500V nach Bestrahlung

Tabelle 3.3: Übersicht der Sensoranforderungen für die HPK-Kampagne

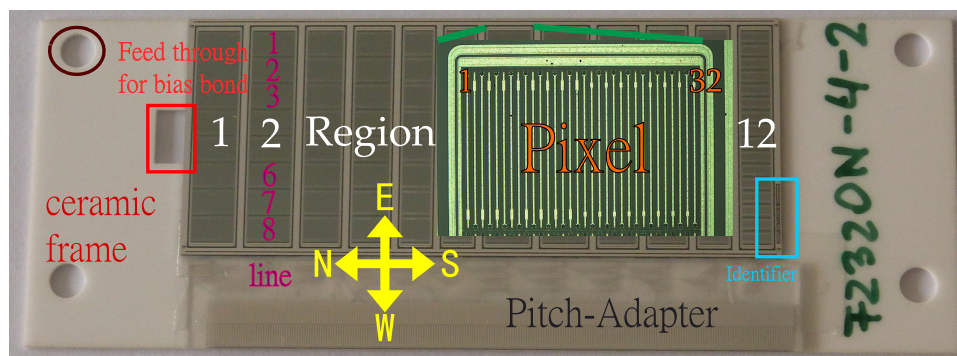


Abbildung 3.2: **Fotographie des MPix-Sensors.** Eingetragen sind die Regions- und Reihenummerierungen sowie die Richtungsdefinition (gelb). Die Vergrößerung einer Region zeigt die erste Pixelreihe und die Pixelnummerierung.

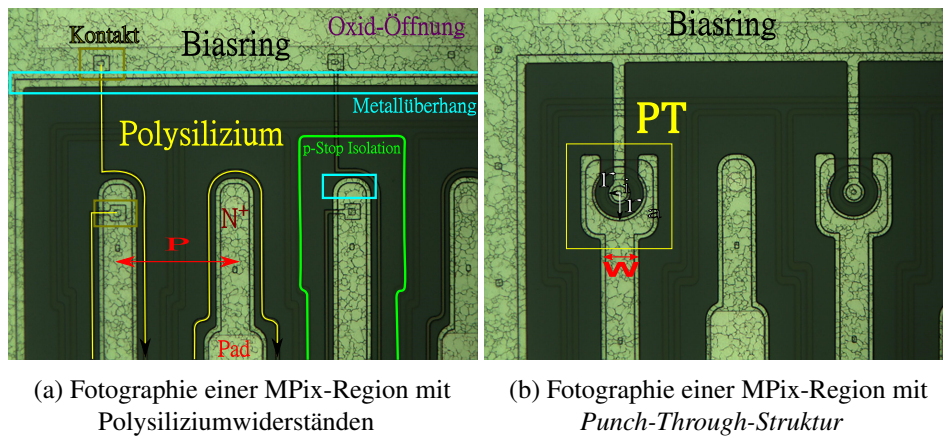


Abbildung 3.3: **Die Bias-Strukturen des MPix-Sensors.** In den Abbildungen ist jeweils eine Sensorregion mit Polysiliziumwiderständen bzw. *Punch-Through-Strukturen* dargestellt.

Der MPix-Sensor besteht aus zwölf Regionen, welche sich, wie in Abbildung 3.2 gezeigt ist, in der Pixelgeometrie und der *Bias-Struktur* unterscheiden. Jede Region hat einen Schutzring und einen *Biasring*. Die Pixel sind in 8 bzw. 16 Reihen mit je 32 Pixeln angeordnet. Die Regionen unterscheiden sich

- in der **Pixellänge** (1171 bzw. 2421 μm)
- dem **Pixelraster** (80, 100 bzw. 120 μm)
- und den, in den Abbildungen 3.3a bzw. 3.3b dargestellten, **Bias-Strukturen** (Polysiliziumwiderstand und *Punch-Through-Struktur*)

Für jede Region ist das Verhältnis aus der Pixelbreite und dem Pixelraster gleich. Die Pixelgeometrien der Regionen sind in der Tabelle 3.4 aufgelistet. Eine Detailansicht einer Region ist in der Abbildung 2.19 gezeigt.

Namensschema Alle Strukturen werden mit einem Identifikationsschlüssel bezeichnet, dessen Details in Tabelle 3.5 ersichtlich sind:

$$\text{Substrat} \text{ Dicke Technologie} - \text{Wafernummer} - \text{Strukturname} \quad (3.1)$$

Dieser Schlüssel wird für MPix-Sensoren erweitert:

$$\text{Identifikationsschlüssel}_{\text{Regionsnummer}} - \text{Raster}_{\text{Pixelreihe}}_{\text{Pixelnummer}} \quad (3.2)$$

Region	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Pixelraster	120	120	100	100	80	80	120	120	100	100	80	80
Dotierungsbreite	28	28	23	23	18	18	28	28	23	23	18	18
Breite/Raster	0,233	0,233	0,230	0,230	0,225	0,225	0,233	0,233	0,230	0,230	0,225	0,225
Aluminiumbreite	41	41	36	36	31	31	41	41	36	36	31	31
Pixellänge	2421	2421	2421	2421	2421	2421	1171	1171	1171	1171	1171	1171
Pixelfläche[mm ²]	0,678	0,678	0,557	0,557	0,436	0,436	0,328	0,328	0,270	0,270	0,211	0,211
Regionsfläche[cm ²]	0,798	0,798	0,665	0,665	0,532	0,532	0,798	0,798	0,665	0,665	0,532	0,532
Widerstandstyp	PT	PS	PT	PS	PT	PS	PT	PS	PT	PS	PT	PS
Farbcode	Schwarz	Grau	Rot	Orange	Blau	Cyan	Grün	Hellgrün	Violett	Rosa	Gold	Gelb

Tabelle 3.4: **Pixelgeometrien der Regionen des MPix-Sensors.** Alle Längen- und Breitenangaben sind in μm , sofern nicht anders vermerkt. Die *Bias-Strukturen* sind Polysiliziumwiderstand (PS) oder *Punch-Through-Struktur* (PT). Der angegebene Farbcode bezieht sich auf die Darstellung von Messungen dieser Regionen innerhalb dieser Arbeit.

Schlüsselabschnitt	Werte	Bedeutung
Substrat	FZ M E	FZ-Silizium „ <i>Deep Diffusion</i> “ MCz-Silizium „ <i>Deep Diffusion</i> “ Epitaktisches Silizium
Dicke	50, 100, 120 200, 320	Aktive Dicke [μm]
Technologie	N P Y	p-in-n n-in-p mit p-Stop n-in-p mit p-Spray
Wafernummer	01 ... 12	Nummer des Wafers dieses Materials
Strukturname	...	Name der Struktur des Wafers

Tabelle 3.5: Namensschlüsseldefinition für die HPK-Kampagne

Selbsttriggerndes Modul

Der MPix-Sensor ist eine Teststruktur für das geplante, selbsttriggernde Modul [42, 139], deren Funktionsprinzip in Abbildung 3.1a gezeigt wird. Im Magnetfeld des Detektors werden geladene Teilchen durch die Lorentz-Kraft in Abhängigkeit des Impuls p_T entsprechend der Formel 1.9 abgelenkt. Anhand der Änderung der Durchgangsposition für zwei Sensorlagen kann der Teilchenimpuls abgeschätzt werden. Da nur Teilchen mit großem Transversalimpuls einen Trigger auslösen, tragen somit auch Informationen des Spurdetektors zur Ereignisselektion bei.

3.2 Zusammenfassung bisheriger Ergebnisse anderer Arbeitsgruppen

Die bisherigen Ergebnisse der HPK-Kampagne wurden in zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten [20, 79, 53, 146, 53, 94, 57, 22, 86, 85, 48, 71, 124, 49, 140, 55, 59, 56, 80, 71, 65, 64, 66, 63, 62, 87] publiziert¹. Im Folgenden werden die für diese Arbeit wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.

3.2.1 Dioden- und Teststrukturmessungen

Ein Ergebnis der Messungen war, dass der Verluststrom für die Proben die mit der, auf Seite 42 eingeführten, „Deep diffusion“-Technologie, hergestellt wurden, einen höheren Strom aufweisen, je dünner der aktive Bereich ist [22]. Spätere Untersuchungen zeigten, dass durch den „Deep diffusion“-Prozeß ein zusätzlicher Defekt, (H(220K)), in das Silizium eingebracht wird, der als Stromgenerator agiert.

Untersuchungen zur Änderung bei Bestrahlung zeigen einen Anstieg des Dunkelstromes in Abhängigkeit des Strahlenflusses, der vergleichbar mit älteren Untersuchungen ist [62]. Messungen an den Teststrukturen zeigen einen kleineren Schädigungsparameter Alpha, eingeführt auf Seite 34, für Sensoren aus Float-Zone-Silizium mit einer aktiven Dicke von 200 µm als für Sensoren aus 200 µm dickem Magnetic-Czochralski-Silizium und 320 µm dickem Float-Zone-Silizium [22, 112].

3.2.2 Sensormessungen

Messungen an Baby- und Multistreifensensoren ergaben[68, 117]:

- Die Verarmungsspannung steigt mit dem Bestrahlungsfluss an und erreicht für alle Sensoren, mit Ausnahme des M200N, für eine Dosis kleiner $1 \times 10^{15} n_{eq}$ die technische Grenze von 600 V.
- Aus dem Anstieg des Stromes mit der Bestrahlungsdosis lässt sich der gleiche Schädigungsparameter wie bei den Dioden bestimmen.
- Die Zwischenpixelkapazität verändert sich nicht durch Bestrahlung.
- Der Polysiliziumwiderstand erhöht sich nichtkritisch mit zunehmender Strahlendosis.
- Der Zwischenpixelwiderstand nimmt über mehrere Größenordnungen mit der Strahlendosis ab.

¹ Auswahl

Kapitel 4

Messaufbau und Softwarepakete

Im folgenden Kapitel werden die verwendeten Messgeräte 4.1, der Messaufbau 4.2 und die entwickelte Software, Kapitel 4.3 bzw. 4.4, beschrieben.

4.1 Der Messplatz

Alle Messungen wurden an der Probestation **PA200** [31] durchgeführt. Diese Probestation wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit in Betrieb genommen. Die wichtigsten Komponenten sind:

1. XYZ-Tisch mit Temperaturregelung und folgenden Kenngrößen

- Verfahren des Tisches mit einer Genauigkeit von einem Mikrometer
- Regelung der Probestemperatur mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ K
- An der metallisierten Tischoberfläche kann eine Spannung von bis zu 3 kV angelegt werden.

2. Klimakammer mit Trockenluftanschluss

- Einstellung des Taupunktes der Probenumgebung auf unter -40 °C

3. Nadelhalter mit XYZ-Manipulator

- Kontaktierung der Probenkontaktpunkte

4. Dunkelkammer

- Verhindert die Absorption des Umgebungslichtes

5. Am XYZ-Tisch befestigte Nadelkartenhalterung

- Die Nadelkarte hat zwei Nadeln im Abstand von $100\text{ }\mu\text{m}$, über die eine dauerhafte Kontaktierung des *Biasrings* und des Schutzringes der MPix-Sensoren gewährleistet wird.

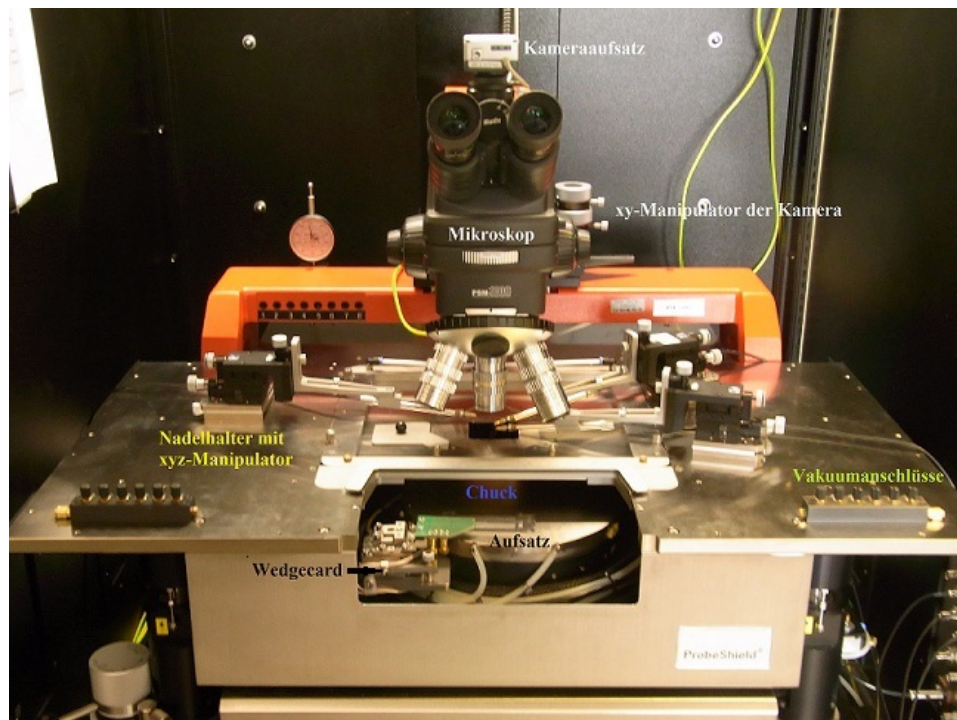


Abbildung 4.1: Fotografie des Messplatzes

6. MPix-Sensoraufsatz

- Zur Kontaktierung der MPix-Sensoren, die in einem Keramikrahmen befestigt sind, wurde ein Adapter konstruiert und gebaut.

Abbildung 4.1 zeigt ein Foto der Probestation. Es sind der XYZ-Tisch (Chuck), die Klimakammer, die Nadelhalter und die Nadelkartenhalterung (Wedgcard) gekennzeichnet.

4.1.1 Messgeräte und Spannungsversorgungen

Eine Übersicht der verwendeten Spannungsquellen und Messgeräte ist in Tabelle 4.1 gegeben.

Funktionsweise LCR-Meter

Ein **LCR**-(Inductance(L)-Current(C)-Resistance(R))-Meter dient zur Impedanzmessung [2, 3, 4]. Die Impedanz $Z = R + iX$ lässt sich in einen Realteil R (Ohmscher Widerstand) und einen Imaginärteil iX (Kapazität oder Induktivität) zerlegen.

Gerät	Funktion	Bereich	Genauigkeit
Keithley 6485	Picoampermeter	10 fA ... 21 mA	0,4% + 400 fA 0,1% + 1 µA
Keithley 6417B	Elektrometer	2 V ... 200 V	0,025% · Range + 4Count 0,00054 ... 0,054 V
Agilent E4981	LCR-Meter	1 aF ... 2 nF	0,125% 0,085%
Keithley 2410	Spannungsquelle	5 µV ... 1100 V	0,02% + 2,4 mV 0,02% + 100 mV

Tabelle 4.1: **Verwendete Messgeräte und Spannungsquellen.** Die Daten sind aus den entsprechenden Betriebshandbüchern entnommen [90, 89, 2]. Die Genauigkeit ist für Raumtemperatur angegeben und bezieht jeweils auf die minimale bzw. maximale Bereichseinstellung.

Zwischen dem Realteil und Imaginärteil einer Wechselspannung V_{AC} ist der Phasenwinkel Θ

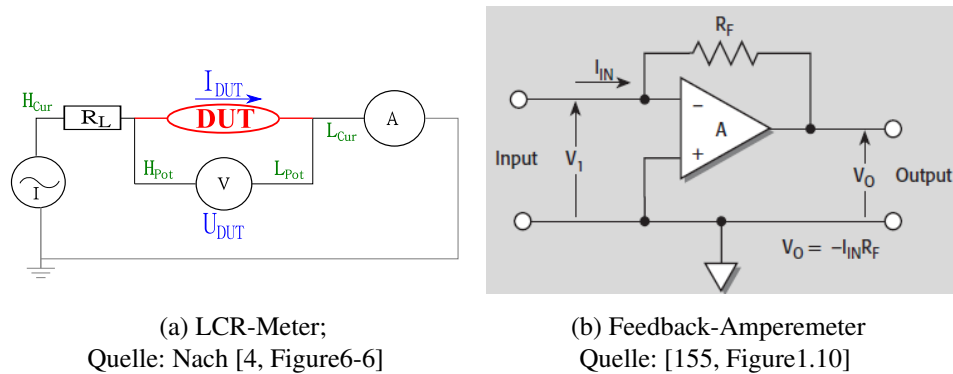
$$\Theta = \arctan \left(\frac{|X = -\frac{1}{\omega C}|}{R_L} \right) \quad (4.1)$$

mit der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ und dem Lastwiderstand R_L .

Der prinzipielle Aufbau eines LCR-Meters ist in Abbildung 4.2a gezeigt. Mit den Eingängen H_{Pot} und L_{Pot} wird der Spannungsabfall $U_{DUT}(t) = U_{AC} \cdot \cos(\omega t + \Theta)$ über die Probe (DUT) bestimmt. Zusätzlich wird mit den Eingängen H_{Cur} und L_{Cur} der über die Probe der fließende Strom $I_{DUT}(t) = I_{AC} \cdot \sin(\omega t + \Theta)$ gemessen.

Aus dem Betrag der Impedanz $|Z| = U_{DUT}/I_{DUT}$ und dem Phasenwinkel lassen sich der Realteil $R = |Z| \cos(\Theta)$ und der Imaginärteil $X = |Z| \sin(\Theta)$ der Impedanz berechnen.

Koppelbox Da die Sensoreigenschaften bei vollständiger Verarmung gemessen werden, muss eine Spannung V_{Bias} an den Sensor angelegt werden. Um das LCR-Meter vor Überspannung zu schützen, wird eine Koppelbox verwendet. Im Grundprinzip ist die Koppelbox ein Hochpassfilter, der die Gleichspannung von der Wechselspannung trennt, sodass die Gleichstromanteile nur über die Spannungsquelle fließen können [30].



(a) LCR-Meter;
Quelle: Nach [4, Figure6-6]

(b) Feedback-Amperemeter
Quelle: [155, Figure1.10]

Abbildung 4.2: **Prinzipieller Aufbau eines LCR-Meters und eines Amperemeters**

Funktionsweise Picoamperemeter

Ein Picoamperemeter dient zur Messung kleiner Ströme. Die, in Abbildung 4.2b gezeigte, Grundsaltung des Amperemeters verwendet einen Operationsverstärker (A). Bei einem Feedback-Amperemeter werden der invertierende Eingang (-) und der Ausgang über einen Rückkopplungswiderstand R_F verbunden [72, Abbildung 14.1].

Die durch die Lastspannung V_1 erzeugte Ausgangsspannung $V_o = -R_F \cdot I_{in}$ ist direkt proportional zum Eingangsstrom I_{in} . Die Ausgangsspannung wird mit einem Strom-Spannungs-Wandler in ein digitales Signal umgewandelt [72, Abbildung 16.16].

4.2 Messaufbau und Messeinstellungen

Zur Sensorcharakterisierung wurden an allen Sensorregionen sieben Standardmessungen durchgeführt [18]. Diese Standardmessungen wurden durch spezielle Untersuchungen an ausgewählten Sensoren ergänzt. Diese Messungen werden in den entsprechenden Kapiteln eingeführt. Alle nicht gemessenen Pixel und der Schutzring sind nicht kontaktiert.

Alle Messungen wurden für unbestrahlte Sensoren bei einer Temperatur von 22 °C und bei bestrahlten Sensoren bei einer Temperatur von −20 °C durchgeführt. Der Trockenluftstrom wurde so eingestellt, dass der Taupunkt innerhalb der Klimakammer stets niedriger als −25 °C war.

Die Spannungseinstellungen der Standardmessungen sind in der Tabelle 4.2 aufgeführt. Die Bereichseinstellungen der Messgeräte und Spannungsquellen wurden von den Geräten per „Auto-Range“-Befehl eigenständig gewählt.

Bei allen Kapazitätsmessungen betrug die Frequenz der Wechselspannung 1 MHz und die Amplitude 1 V. Um die Kabelkapazität auszugleichen, wurde vor den Messungen stets eine Nullpunktskorrektur [2, Page 105] vorgenommen. Bei Messungen mit der Koppelbox wurde die Spannung V_{Bias} nach der Messung in 50 V Schritten zurückgefahren.

4.2.1 Abhängigkeit des Dunkelstromes des *Biasrings* von der Spannung

In Abhängigkeit der Spannung V_{Bias} wird die Summe der Ströme des *Biasrings* und die Summe, der über die *Bias-Strukturen* fließenden Pixelströme, gemessen.

Der Messaufbau in Abbildung 4.3a zeigt, dass an der Sensorrückseite die Spannung V_{Bias} angelegt und am *Biasring* der Dunkelstrom $I(V)_{Bias}$ gemessen wird.

Als Kenngrößen werden der Strom bei einer Feldstärke von $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ gemessen, I_{Bias} , und die Durchbruchspannung V_{Break} berechnet.

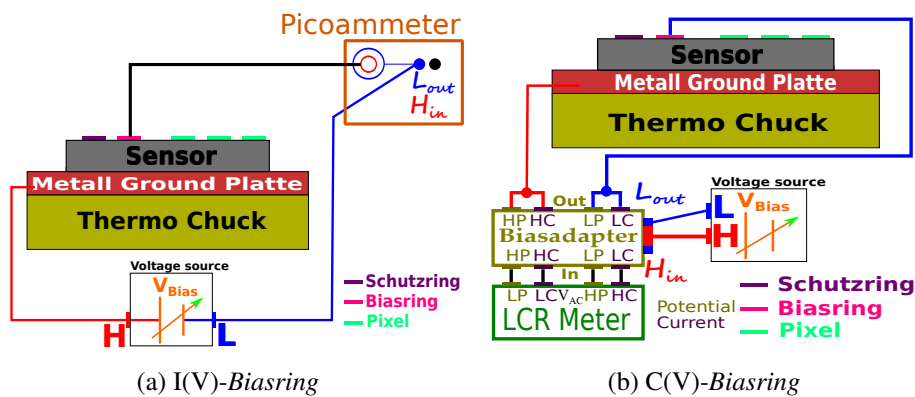


Abbildung 4.3: Schaltbilder der *Biasring*-Messungen

Messung	Messbereich [V]			V_{Bias} [V]
	Start	End	Schrittweite	
$I(V)_{Bias}$	0	100	5	—
	100	500/700/1000	10	—
$C(V)_{Bias}$	5	200	5	—
	200	450	10	—
$I(V)_{Pixel}$	5	100	5	—
	100	500/700/1000	10	—
$C(V)_{Pixel}$	5	200	5	—
	200	450	10	—
<i>Zwischenpixelwiderstand</i>	-2,5	2,5	0,25	500
<i>Zwischenpixelkapazität</i>	5	100	5	—
	100	500	10	—
<i>Polysiliziumwiderstand</i>	-2,5	2,5	0,25	500
$I(V)_{PT-Überblick}$	0	<42	0,5	500
$I(V)_{PT-Scan}$	$V_{PT} - 5 \text{ V}$	$V_{PT} + 5 \text{ V}$	0,1	500

Tabelle 4.2: **Spannungseinstellungen der Messungen.** Notiert sind die Start- und Endspannung und die Schrittweite. Die Endspannung ist abhängig von der Sensordicke. 500 V wurden für die 50 und 100 μm , 700 V für die 120 und 200 μm und 1000 V für die 320 μm dicken Sensoren verwendet. Für Messungen, die eine zusätzliche Spannung V_{Bias} brauchen, ist dieser Wert ebenfalls aufgeführt. Alle Werte sind betragsmäßig angegeben. Für n-leitende Sensoren wurde eine positive und für p-leitende Sensoren eine negative Spannung verwendet.

Die Größe $I_{Vol} := \frac{I_{Bias}}{V}$ ist der durch das, in Tabelle 3.4 aufgelistete, Regionsvolumen V geteilte Volumenstrom und wird in Ampere je Kubikzentimeter angegeben.

Ermittlung der Durchbruchsspannung Die auf Seite 63 eingeführte Durchbruchsspannung, wird durch das Überschreiten eines sich aus der Tabelle 3.3 ergebenden Schwellwertes oder, gemäß Kollaborationsmessrichtlinie V2.7 [50], über das Anstiegsverhalten des Dunkelstromes ermittelt

$$\frac{\Delta I/I}{\Delta V_{Bias}} > \frac{0.1}{(V_{Bias} > 50V)} . \quad (4.2)$$

4.2.2 Abhängigkeit der *Biasring*-Kapazität von der Spannung

Es wird die Kapazität des *Biasrings* zur Sensorrückseite in Abhängigkeit von der Spannung V_{Bias} gemessen. Abbildung 4.3b zeigt den Messaufbau. Für die Messung wird mittels der Koppelbox V_{Bias} - und die Messspannung V_{AC} überlagert und beide an der Sensorrückseite angelegt. Am *Biasring* wird das Signal ausgelesen.

Als Kenngrößen werden die Kapazität bei einer Feldstärke von $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ gemessen, C_{Bias} , und die Verarmungsspannung V_{Depl} ermittelt.

Die Flächenkapazität $C_{Area} := C_{Bias}/A$ ist der Quotient von C_{Bias} , und der in Tabelle 3.4 aufgelisteten, Regionsfläche A und wird in Picofarad je Quadratzentimeter angegeben.

Berechnung der Verarmungsspannung

Die auf Seite 47 eingeführte Verarmungsspannung V_{Depl} lässt sich, aufgrund der mit Formel 2.16 beschriebenen Abhängigkeit der Sperrschichtweite von der Spannung V_{Bias} , graphisch aus einer $1/C^2$ -Darstellung bestimmen. Wie in Abbildung 2.4b verdeutlicht, wird dafür eine lineare Anpassung der Bereiche vor und nach der Verarmung bestimmt und der Schnittpunkt beider Geraden berechnet. Ein Algorithmus, um die Anpassungsbereiche automatisch zu bestimmen, wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt.

Der Algorithmus berechnet mit zwei unabhängigen Methoden die Verarmungsspannung und nimmt diese Werte als Eingabeparameter für die Bestimmung der Anpassungsbereiche. Vor den Berechnungen werden die Messergebnisse durch einen Savitzky-Golay-Filter [131] mit Polynomen zweiter Order geglättet.

Methode 1 - Kurvendiskussion Da die zweite Ableitung für Messkurven zu stark vom Rauschen bestimmt ist, wird für die Messpunkte $(V, C(V))$ die erste Ableitung wie folgt berechnet:

$$f'(V) := \frac{1}{2} \left(\frac{C(V)_{i+1} - C(V)_i}{V_{i+1} - V_i} + \frac{C(V)_i - C(V)_{i-1}}{V_i - V_{i-1}} \right) . \quad (4.3)$$

Die Ableitung wird auf Eins normiert.

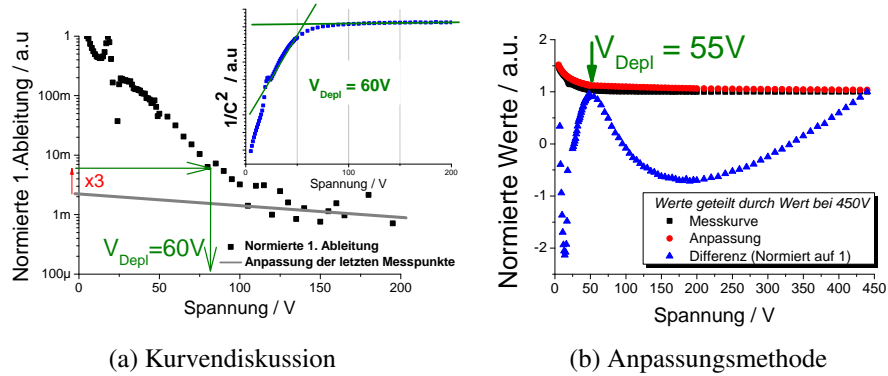


Abbildung 4.4: Berechnung der Verarmungsspannung

Für die letzten zehn Messpunkte wird von der normierten Ableitung eine lineare Anpassung vorgenommen und der Schnittpunkt mit der Y-Achse berechnet. Eine Untersuchung zeigte, dass die Verarmungsspannung bei dem Wert ist, bei dem die normierte Ableitung etwa den dreifachen Wert des Schnittpunktes mit der Y-Achse hat. Der so ermittelte Wert wird $V_{Depl-De}$ benannt.

Ein Beispiel für das Verfahren ist in Abbildung 4.4a gegeben. Abgebildet sind die normierte erste Ableitung, der Schnittpunkt der linearen Anpassung der letzten 10 Werte mit der Y-Achse und die berechnete Verarmungsspannung. Rechts oben ist das Ergebnis des graphischen Verfahrens dargestellt.

Methode 2 - Anpassungsmethode Bei der zweiten Methode wird die Messkurve durch die Funktion

$$F_{Fit}(V_{Bias}) = \frac{C_3}{\sqrt{V_{Bias}}} - C_2 V_{Bias} + C_1 \quad (4.4)$$

angenähert. Dafür wird der Levenberg-Marquardt-Algorithmus angewandt [84]. Für den Startwert von C_3 wird der erste Messwert gewählt, die Startwerte von C_1 und C_2 werden aus einer linearen Anpassung der letzten zehn Messwerte bestimmt. Zusätzlich wird die Wichtung der Eingabewerte so gewählt, dass die ersten und letzten 10% der Messpunkte ein zehnfach höheres Gewicht als die übrigen Messpunkte haben.

Da der erste Term der Näherungsfunktion 4.4 den Spannungsbereich vor der vollständigen Verarmung beschreibt und die letzten beiden Terme den Spannungsbereich nach der vollständigen Verarmung wiedergeben, kommt es bei der Verarmungsspannung zu einer maximalen Differenz aus Messwerten und Kurvenanpassung. Der zugehörige Spannungswert wird als $V_{Depl-Fit}$ bezeichnet.

Ein Veranschaulichung dieser Methode ist in der Abbildung 4.4b dargestellt.

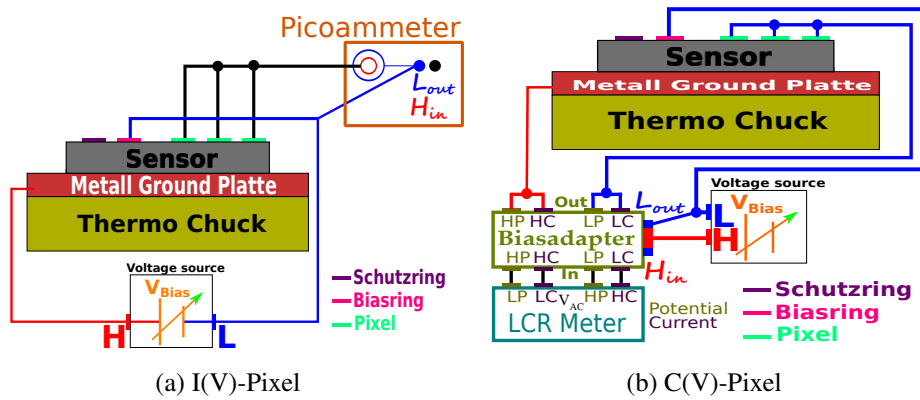


Abbildung 4.5: Schaltbilder der Pixelmessungen

Weiterführende Berechnungen Weichen die Ergebnisse der beiden Methoden weniger als 25% voneinander ab, wird für die letzten zehn Messpunkte und alle Messpunkte aus dem Spannungsbereich $0,25 \dots 0,75 \cdot (V_{Depl-Der} + V_{Depl-Fit}) / 2$ der Wert $1/C^2$ berechnet.

Anschließend wird für die berechneten Werte eine lineare Anpassung vorgenommen und der Schnittpunkt beider Geraden berechnet. Der so ermittelte Wert wird $V_{Depl-Final}$ genannt.

Die ausgegebene Verarmungsspannung V_{Depl} ist die gewichtete Summe aller Ergebnisse.

$$V_{Depl} = \frac{3 \cdot V_{Depl-Final} + 2 \cdot V_{Depl-Der} + V_{Depl-Fit}}{6} \quad (4.5)$$

Algorithmustest Der Vergleich der Ergebnisse mit den Ergebnissen der graphischen Methode in Tabelle 4.3, zeigt für alle Sensortypen eine gute Übereinstimmung innerhalb von 20 V.

Für zwei Messungen der Stichprobe wird eine Fehlermeldung durch die interne Konsistenzprüfungen generiert. Für eine Messung gibt es eine Abweichung von 50 V.

4.2.3 Abhängigkeit des Pixeldunkelstromes von der Spannung

Es wird der, über den Pixel fließende, Dunkelstrom in Abhängigkeit von der Spannung V_{Bias} gemessen. Abbildung 4.5a zeigt, dass die Spannung V_{Bias} an der Sensorrückseite angelegt und der über drei Pixel fließende Strom gemessen wird. Als Kenngrößen werden der Strom bei einer Feldstärke von $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ gemessen, und durch die Anzahl der Pixel geteilt, I_{Pixel} , sowie die Durchbruchsspannung wie beim *Biasring* ermittelt.

¹ Weniger als 3 Anpasspunkte

² Abweichung beider Methoden zu groß

Sensor	$V_{Depl-Graph}$	$V_{Depl-Der}$	$V_{Depl-Fit}$	$V_{Depl-Final}$
E50N_12-80	35	45	20	— ¹
E50P_9-100	30	55	30	35
E50Y_1-120	120	110	105	125
E100N_8-120	60	70	60	55
E100P_7-120	90	100	35	— ²
E100Y_3-100	140	130	170	145
FZ120N_4-100	115	115	120	115
FZ120P_7-120	130	130	130	180
FZ120Y_6-80	115	90	85	130
FZ200N_9-100	185	180	210	190
FZ200P_12-80	105	105	100	100
FZ200Y_1-120	160	140	135	175
FZ320N_2-120	230	220	220	220
FZ320P_3-100	235	220	220	220
FZ320Y_6-80	245	240	260	260
M200N_10-100	170	175	180	180
M200P_5-80	200	200	210	220
M200Y_6-80	130	140	140	135
S10938-8380	40	40	36	40
Modellkurve	86	100	100	92

Tabelle 4.3: **Vergleich der ermittelten Verarmungsspannung** der graphischen Methode ($V_{Depl-Graph}$), der beiden Methoden ($V_{Depl-Der}$ und $V_{Depl-Fit}$) und dem final ermittelten Wert V_{Depl} anhand einer zufällig ausgewählten Stichprobe von MPix-Sensoren. Zusätzlich wurde ein Prototypsensor (S10938-8380) für einen Luminositätsmonitor (LumiCal) am International Large Detector getestet. Die Modellkurve wird durch die Formel 4.4 beschrieben.

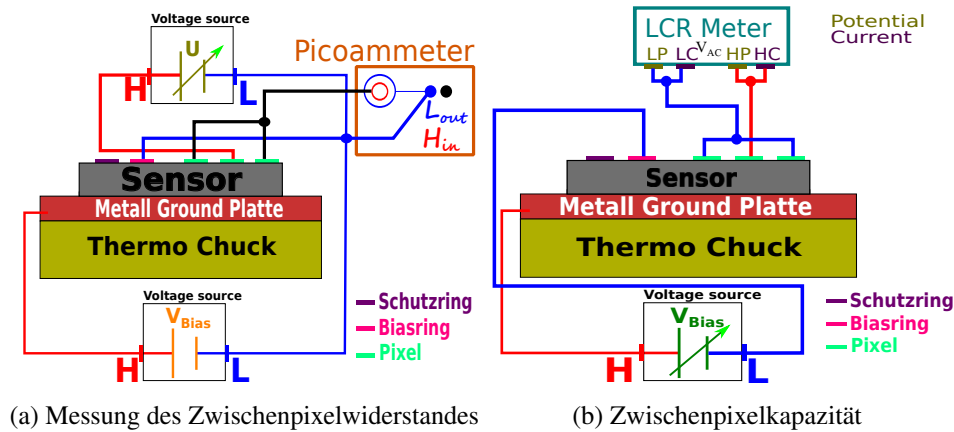


Abbildung 4.6: Schaltbilder der Zwischenpixelmessungen

Der Volumenstrom des Pixels $I_{Vol-Pixel}$ ist $I_{Vol-Pixel} = I_{Pixel}/V_{Pixel}$ und wird in Ampere pro Kubikzentimeter angegeben. Das Pixelvolumen ist Pixellänge L mal Pixelraster P mal Sensordicke.

Die Spannung, bei der ein lokales Strommaximum auftritt, wird als Peakspannung V_{Peak} bezeichnet. Ein Beispiel befindet sich in Abbildung 5.15a, welche auch die Unabhängigkeit von der Pixelanzahl zeigt.

4.2.4 Abhängigkeit der Pixelkapazität von der Spannung

Es wird die Kapazität des Pixels zur Sensorrückseite in Abhängigkeit von der Spannung V_{Bias} gemessen. Der Messaufbau ist in Abbildung 4.5b gegeben. Es wird an der Sensorrückseite die Überlagerung der Betriebsspannung V_{Bias} und der Messspannung V_{AC} angelegt. Anschliessend wird die Kapazität von drei Pixeln parallel gemessen und über die Koppelbox ausgelesen.

Als Kenngrößen werden die Kapazität bei einer Feldstärke von $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ mit einem von der Pixelanzahl abhängigen Faktor geteilt C_{Pixel} , und die Verarmungsspannung, $V_{Depl-Pixel}$, wie beim *Biasring* bestimmt.

Die gemessene Kapazität wird durch die Pixelfläche, gleich Pixellänge mal Pixelbreite, geteilt $C_{Area-Pixel}$ und in Picofarad je Zentimeter angegeben.

4.2.5 Messung des Zwischenpixelwiderstandes

Durch den Messaufbau in Abbildung 4.6a wird der Sensor durch die Spannung V_{Bias} verarmt. Mit der zweiten Spannungsquelle wird ein Strom in den zentralen Pixel eingeprägt und der über die Nachbarpixel fließende Strom gemessen. Zur Anpassung des Referenzpotentials werden die Massen der Spannungsquellen verbunden. Der Widerstand wird aus dem Anstieg der Strom-Spannungs-Abhängigkeit bestimmt.

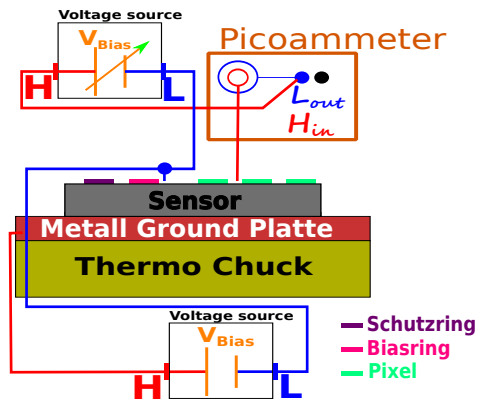


Abbildung 4.7: Schaltbild die *Bias-Strukturen*messung

Als Kenngröße wird der bestimmte Widerstand durch die Anzahl der Nachbarn geteilt, $R_{int} \cdot R_{intNorm} = R_{int} / (P - W)$ ist der durch den Pixelabstand geteilte Widerstand und wird in Ohm je Mikrometer angegeben.

4.2.6 Messung der Zwischenpixelkapazität

Es wird die Kapazität zwischen dem zentralen Pixel und seinen beiden Nord-Süd-Nachbarn in Abhängigkeit von der Spannung V_{Bias} gemessen. Abbildung 4.6b zeigt den Messaufbau. Für die Messung wird der Sensor schrittweise mit V_{Bias} verarmt, die Messspannung V_{AC} an den zentralen Pixel angelegt und über die Nachbarn zurückgeführt.

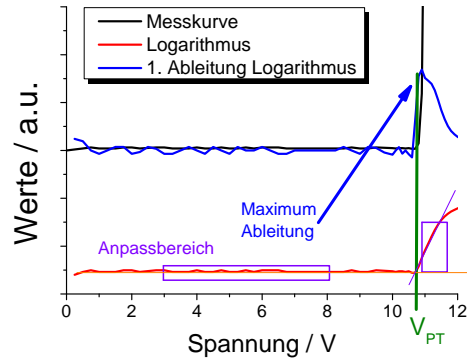
Als Kenngröße wird die Kapazität bei einer Feldstärke von 1,25 Volt pro Mikrometer Sensordicke durch die Anzahl der Nachbarn geteilt C_{int} .

4.2.7 Messung der *Bias-Strukturen*

Es wird der zwischen Pixel und *Biasring* über die *Bias-Strukturen* fließende Strom gemessen. Der in Abbildung 4.7 gezeigte Messaufbau ist für beide *Bias-Strukturen* des MPix-Sensors identisch. Der Sensor wird durch eine Spannung V_{Bias} verarmt. Durch einen zweiten Stromkreis wird eine Spannung an den Pixel angelegt und der über *Bias-Strukturen* fließende Strom am *Biasring* gemessen. Der Strom wird auf der Hochpotentialseite des Stromkreises gemessen. Zum Potentialausgleich werden beide Massen der Spannungsquellen verbunden.

Messung des Polysiliziumwiderstandes Die Berechnung des Widerstandes R_{Poly} erfolgt durch lineare Anpassung des gemessenen Strom-Spannungs-Verhaltens. Als Kenngröße wird R_{Poly} durch die Widerstandslänge geteilt $R_{Poly-Norm}$ und der Wert in Megaohm je Zentimeter angegeben.

Bestimmung der Punch-Through-Spannung


 Abbildung 4.8: Veranschaulichung der Algorithmus zur Bestimmung der *Punch-Through-Spannung*.

Messung der *Punch-Through-Struktur* Für die *Punch-Through-Struktur* wird der differentielle Widerstand bestimmt. Da die *Punch-Through-Spannung* V_{PT} von der Sensorgeometrie abhängt, muss diese zuerst durch eine Überblickmessung grob bestimmt werden „ $I(V)_{PT-Überblick}$ “. 42 V ist die maximale Spannung bis zu der gemessen wurde, da für höhere Spannungen die Gehäuseisolierung des Amperemeters vom Hersteller nicht garantiert ist.

Anschließend wird der Spannungsbereich $\pm 5V$ um V_{PT} mit einer Schrittweite von 0,1 V, „ $I(V)_{PT-Scan}$ “, gemessen und der differentielle Widerstand berechnet.

Als Kenngrößen werden die *Punch-Through-Spannung*, V_{PT} , der differentielle Widerstand bei dieser Spannung, R_{PT} , die Sprungspannung V_{Jump} und der Widerstand am Arbeitspunkt R_{WP} bestimmt.

Bestimmung des Arbeitspunktes

Zur Bestimmung des Arbeitspunktes wurde von der Kennlinie der *Punch-Through-Struktur* der Wert bei Null Volt abgezogen. Anschließend wird der Dunkelstrom des Pixel bei einer Feldstärke von $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ aus der Datenbank ausgelesen, I_{Pixel} , und die Spannung V_{WP} ermittelt, bei der die Kennlinie der *Punch-Through-Struktur* den Wert I_{Pixel} hat. Für diese Spannung wird der zugehörige Stromwert I_{WP} genannt und mittels beider Nachbarmesspunkte der differentielle Widerstand R_{WP} bei V_{WP} berechnet

$$R_{PT} = \left(\left| \frac{V_i - V_{i-1}}{I_i - I_{i-1}} \right| + \left| \frac{V_{i+1} - V_i}{I_{i+1} - I_i} \right| \right) / 2, \quad (4.6)$$

wobei „i“ der Index des Messpunktes von V_{WP} ist.

Berechnung der *Punch-Through-Spannung*

Zur Bestimmung der *Punch-Through-Spannung* V_{PT} wurde von mir folgender Algorithmus entwickelt.

1. Für bestrahlte Sensoren wird die Messkurve auf Sprünge untersucht, und gegebenenfalls nur der Spannungsbereich kleiner der Sprungspannung analysiert.
2. Die Messwerte werden mittels eines Savitzky-Golay-Filters mit einem Polynom zweiter Ordnung geglättet, der natürliche Logarithmus berechnet und die erste Ableitung des Logarithmus gebildet.
3. Es wird von der ersten Ableitung das Maximum gesucht. Diese Spannung wird zur Festlegung des Anpassbereiches verwendet.
4. Von dem Logarithmus der Messpunkte werden die Spannungsbereiche 33 bis 66% vor und nach dem Maximum linear angepasst und der Schnittpunkt beider Geraden berechnet. Liegt der Schnittpunkt zwischen den Anpassbereichen wird dieser als V_{PT-Log} bestimmt.

Dieser Algorithmus ist in Abbildung 4.8 veranschaulicht.

Zur Überprüfung wird die relative Änderung der ersten Ableitung berechnet. Als Kriterium wird festgelegt, dass die Ableitung für unbestrahlte bzw. bestrahlte Sensoren größer als das hundert- bzw. das zehnfache der durchschnittlichen Ableitung der ersten 5% der Messwerte sein muss. Die Spannung bei der dieses Kriterium zum erstenmal eintritt wird als V_{PT-Der} bezeichnet.

Eine Untersuchung anhand einer Stichprobe zeigte, dass die Ergebnisse beider Methoden mit einer maximalen Abweichung von einem Volt gleich sind. Der Mittelwert beider Spannungen wird als *Punch-Through*-Spannung V_{PT} bezeichnet.

Für die Spannung V_{PT} wird der **differenzielle Widerstand** R_{PT} nach Formel 4.6 mittels beider Nachbarmesspunkte berechnet.

Bestimmung der Sprungspannung

Bei einigen *Punch-Through-Strukturen* tritt nach Bestrahlung ein Stromsprung auf. Als Kriterium habe ich festgelegt, dass drei aufeinander folgende Messpunkte mindestens einen Faktor zwei größer sein müssen als ihre drei Vorgänger. Wird dieses Kriterium erfüllt, wird die Spannung des vierten Messpunktes dieser Serie von sechs Messpunkten als Sprungspannung V_{Jump} bezeichnet. Der Strom bei der Sprungspannung wird als Sprungstrom I_{Jump} bezeichnet. Ein Beispiel eines Stromsprunges in der Abbildung 5.33a gezeigt.

4.2.8 Messaufbauten für nicht Standardmessungen

Bei dem in Abbildung 4.9 gezeigten, Messaufbau des Spannungsabfalls an der *Bias-Struktur* wird zunächst der Sensor mit der Spannung V_{Bias} verarmt. Der High-Eingang des Elektrometers wird an dem Pixel der Bias-Struktur angelegt und der Low-Eingang an den *Biasring*.

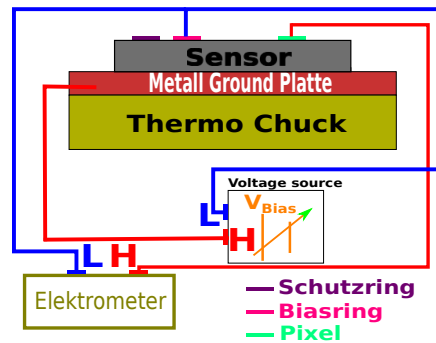


Abbildung 4.9: Messung des Spannungsabfalls an der *Bias-Struktur* mittels eines Elektrometers

Die *Punch-Through-Struktur* kann näherungsweise als Zylinderkondensator mit der Länge als Dotierungstiefe ($1,5 \mu\text{m}$) d , einem Innenradius r_i von $11 \mu\text{m}$ und einem Außenradius r_a von $20 \mu\text{m}$ betrachtet werden, wie aus Abbildung 3.3b ersichtlich wird. Die zusätzliche Kapazität ist daher etwa 2 fF

$$C_{PT} = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \frac{d}{\ln(r_a/r_i)} \approx 2 \text{ fF}. \quad (4.7)$$

Eine direkte Messung ergab einen Wert von 50 fF .

4.3 Die Messsoftware

Zur Steuerung der Messungen wurde die Software „MeasureSoft“ entwickelt. Die Funktionalität dieser Software umfasst:

- Steuerung der Messgeräte und Spannungsquellen:
 - Es können Messungen bei konstanter Betriebsspannung in Abhängigkeit der Betriebsspannung $X(V)$ und Messungen in Abhängigkeit von der Zeit $X(t)$ durchgeführt werden.
 - Es können mehrere Spannungsquellen und Messgeräte gleichzeitig angesteuert werden. Dabei kann, parallel zu einer Spannungsänderung an einer Spannungsquelle, an einer zweiten Spannungsquelle eine konstante Spannung eingestellt werden. Die Messung kann für verschiedene konstante Spannungen wiederholt werden.
 - Die Messgeräte sind so eingestellt, dass Messungen über verschiedene Größen, wie z.B. Strom, Kapazität, Spannung oder Widerstand, gleichzeitig und unabhängig voneinander durchgeführt werden können und dabei die Auswertungsoptionen automatisch angepasst werden.
 - Zusätzlich besteht die Option, die Einstellungen der Messgeräte, wie z.B. die Frequenz des LCR-Meters, zu variieren und die Messung über alle Einstellungsoptionen zu wiederholen.
- Die Steuerung der Probestation
 - Es können freie konfigurierbare Bewegungsmuster in X und Y-Richtung eingegeben werden. An jeder Position werden alle Messungen wiederholt und in einer Sammelausgabedatei vorsortiert.
 - Die Messwiederholung für verschiedene Temperaturen, bei denen lediglich die Höhe des Probestisches manuell angepasst werden muss.
- 32 Datenauswertungsoptionen wie z.B. die Bestimmung der Verarmungsspannung mit dem auf Seite 63 eingeführten Verfahren
- 10 verschiedene Datei- und Datenausgabeformate
- Die Generation der Datenbankeinträge für die Zeuthener Messdatenbank und das automatisierte Schreiben der Daten in der Datenbank
- **Alle Einstellungen können in Textdateien gespeichert und später wieder geladen werden**

Eine detaillierte Beschreibung der Messsoftware befindet sich im Handbuch der Software, welches im Anhangskapitel A zu finden ist.

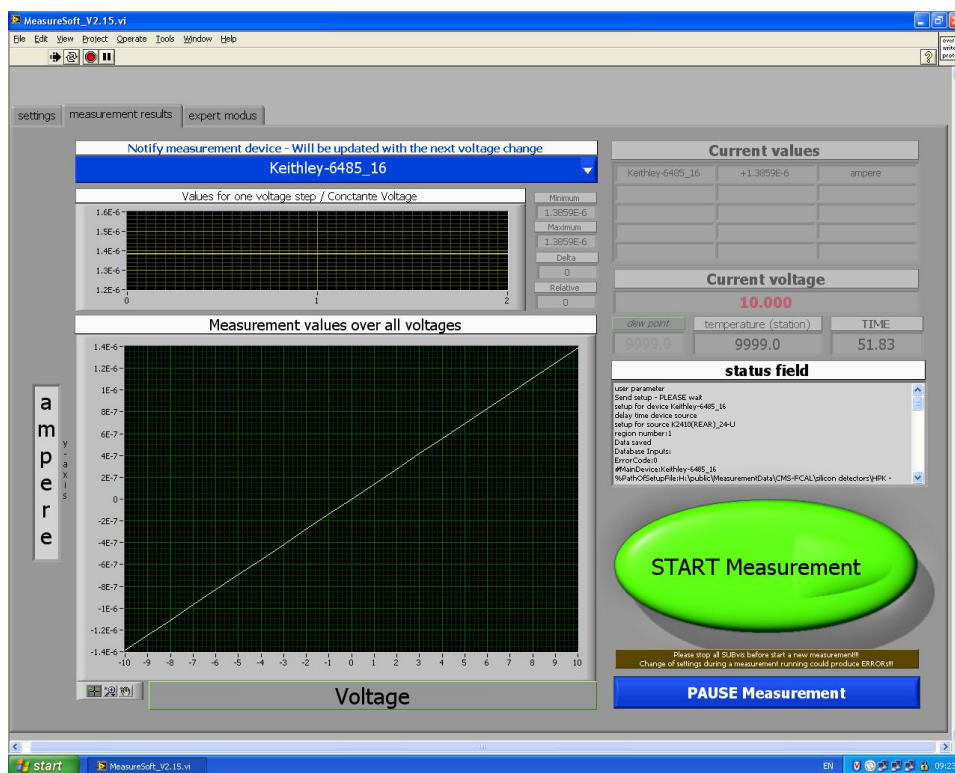


Abbildung 4.10: Die Benutzeroberfläche der Messsoftware

4.4 Die Auswertungsprogramme

Zur Auswertung der Messergebnisse wurden zwei LabVIEW-basierte Programme entwickelt. Diese Programme schreiben die ausgewerteten Daten in die Zeuthener Datenbank und ermöglichen das gezielte Auslesen von Messergebnissen. Eine detaillierte Beschreibung der Programme und der der Datenbankstruktur ist in den Anhangskapiteln B bis D nachzulesen.

4.4.1 Datenanalyseprogramm

Das Analyseprogramm wertet die Rohdaten aus und schreibt die Ergebnisse in die Datenbank. Die Software bietet folgende Optionen:

1. Datenaufbereitung³ z.B.
 - Bei Messungen mit mehreren Nadeln die Daten mit der verwendeten Nadelanzahl zu dividieren.
 - Die Möglichkeit, Daten zu negieren
2. Datenanalyse⁴ z.B.
 - Die Berechnung des Widerstandes durch lineare Regression
 - Die Berechnung der Verarmungsspannung
3. Generation neuer Datenbankeinträge für alte Messdaten
4. Aktualisierung alter Datenbanksätze

4.4.2 Datenausleseprogramm

Dieses Programm kann Daten aus der eigens entwickelten, und im Kapitel D beschriebenen, Datenbank filtern und die Ergebnisse sortiert in Textdateien schreiben. Das Programm erzeugt Datenbankabfragen (SQL-Queries), welche die Informationen aus der Datenbank auslesen. Die wichtigsten Optionen sind:

1. Die Sortierung der Messungen nach Methoden, Messparametern oder abgeleiteten Größen
2. Die Selektion von bestimmten Sensortypen oder Sensornamen
3. Mittelwertbildung und Standardabweichungsberechnung

³Rohdaten werden automatisch in einer neuen Spalte gespeichert und bleiben stets erhalten.

⁴Mit den Auswertungen der Messsoftware synchronisiert

Kapitel 5

Messergebnisse für MPix-Sensoren

5.1 Allgemeine Hinweise zur Darstellung

Insgesamt wurden 18 Sensormaterialien auf ihre Eignung untersucht.¹ Die Benennung der Sensormaterialien ist auf Seite 53 eingeführt. Jeder Sensortyp hat die aus Tabelle 3.1 ersichtliche Farbe. Die Technologien werden durch die Farbhelle unterschieden. N-Sensoren sind am dunkelsten und haben ein Rechteck als Symbol, Y-Sensoren (Kreis) sind am hellsten und P-Sensoren (Dreieck) liegen dazwischen. Bei Sensorregionen wird jeder Kombination aus Pixelraster und Pixellänge eine, in Tabelle 3.4 gezeigte, Grundfarbe zugeordnet. Regionen mit einer *Punch-Through-Struktur* erhalten die dunkleren und dünneren Linien.

Die Regionsbezeichnung besteht aus der Regionsnummer und dem Pixelraster. Die angegebenen Werte sind stets der Mittelwert aller Messungen eines Sensortyps. Einzelpixelmessungen werden durch die Angabe der Pixelnummer gekennzeichnet. Um die Ergebnisse besser vergleichen zu können, wird das elektrische Feld in Volt pro Mikrometer Sensordicke angegeben.

Die aus den Messungen abgeleiteten Größen sind im Kapitel 4.2 eingeführt. Die Spannung V_{Bias} wird so angegeben, dass positive Spannungen der Sperrrichtung und negative Spannungen der Durchlassrichtung entsprechen.

In den schwarzen Kästen ist für unbestrahlte Sensoren die Temperatur und für bestrahlte Sensoren der Strahlenfluß, als Abstand vom Wechselwirkungspunkt, angegeben. Die Angabe „**bestrahlt**“ meint einen Gesamtstrahlenfluß von $13,9 \times 10^{14} n_{eq} \cdot cm^{-2}$, berechnet für einen Abstand von 20 cm vom Wechselwirkungspunkt im CMS-Experiment am LHC nach der dritten Upgradephase.

¹Die Messungen wurden z.T. von Sandro Kollowa und Martin Stegler durchgeführt und mir zur Verfügung gestellt.

KAPITEL 5. MESSERGEBNISSE FÜR MPIX-SENSOREN

Nach jeder Messung wurden die Ergebnisse in zwei Gruppen eingeordnet. Messreihen, bei denen alle Messungen vergleichbare Ergebnisse haben, wurden als **gut** gekennzeichnet. Messungen, bei denen ein hohes Rauschen oder eine Abweichung von mehr als 10% innerhalb einer Region auftraten, wurden als **kritisch** klassifiziert. Ein Beispiel ist in Abbildung 5.1a gegeben, in dem Messung 21 als kritisch und die anderen als gut markiert wurden. Insgesamt wurden 98% der Messungen als gut gekennzeichnet.

Wie Abbildung 5.1b zeigt, gibt es im statistischen Mittel keine Änderung der Ergebnisse durch diese Selektion. Um den Einfluss von Ausreißern bei Messreihen mit kleiner Statistik gering zu halten, werden nur die als gut gekennzeichneten Messungen diskutiert und die Ergebnisse gegebenenfalls mit der gesamten Stichprobe verglichen.

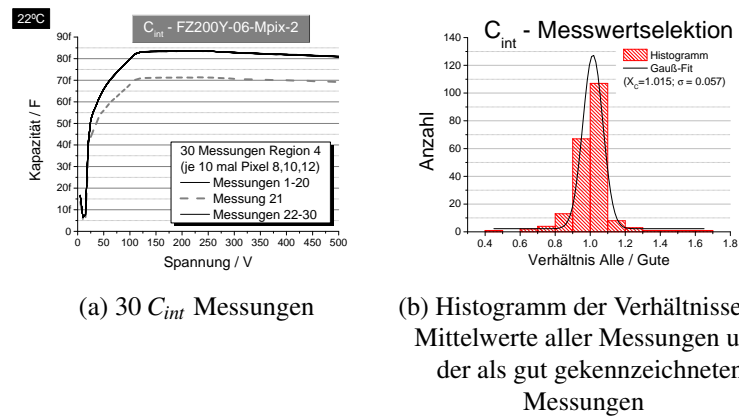


Abbildung 5.1: (a) Zeigt 30 Zwischenpixelkapazitätsmessungen, die abwechselnd an drei Pixeln der Region durchgeführt wurden. (b) Zeigt ein Histogramm der Verhältnisse der Mittelwerte der Zwischenpixelkapazitäten C_{int} von allen Messungen und der Mittelwerte, der als gut gekennzeichneten Messungen. Für diese Statistik wurden alle Sensorregionen und alle Sensortypen verwendet.

5.2 Abhängigkeit des Dunkelstromes des *Biasrings* von der Spannung

5.2.1 Ergebnisse für unbestrahlte Sensoren

Die Abhängigkeit des Dunkelstromes von der Spannung V_{Bias} ist exemplarisch anhand des FZ320N-Sensors in Abbildung 5.2 gezeigt. Für unbestrahlte Sensoren entspricht die Änderung des Stromes mit zunehmender Spannung dem eines pn-Überganges in Sperrrichtung. Der Strom bei einer Feldstärke von $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ ist einige Nanoampere. Folgende Abhängigkeiten wurden beobachtet:

- **Pixelraster** - Für Regionen mit einem Raster von $120 \mu\text{m}$ ist der Strom $24 \pm 2\%$ größer als für Regionen mit einem Raster von $100 \mu\text{m}$ und $44 \pm 7\%$ größer als für Regionen mit einem Raster von $80 \mu\text{m}$.
- **Sensordicke** - Abbildung 5.3a zeigt, dass für Sensoren aus epitaktischem Silizium der Strom mit der Sensordicke wächst. Für Float-Zone-Siliziumsensoren nimmt der Strom hingegen mit der Dicke ab, wie Abbildung zeigt 5.3b. Eine Erklärung für dieses unterschiedliche Verhalten bilden die, bei dem Prozess der „Deep diffusion“ entstehenden, Defekte.
- **Substrat** - Bei gleicher Dicke ist der Strom für Sensoren aus Magnetic-Czochralski-Silizium einen Faktor drei größer als für Sensoren aus Float-Zone-Silizium. Dieses ist erklärbar durch den geringeren spezifischen Widerstand des verwendeten Magnetic-Czochralski-Silizium [44].

Es wurde keine Abhängigkeit von der *Bias-Struktur* und der Technologie gemessen.

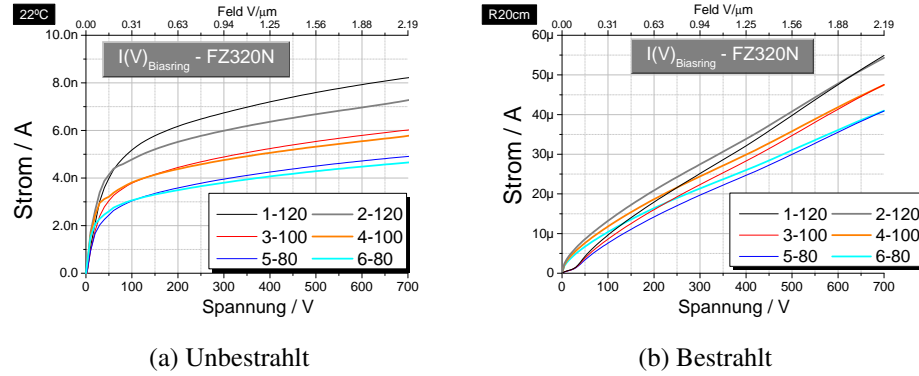


Abbildung 5.2: Abhängigkeit des Stromes des *Biasrings* von der Spannung. Dargestellt sind die Messergebnisse vor und nach Bestrahlung für den FZ320N-Sensortyp.

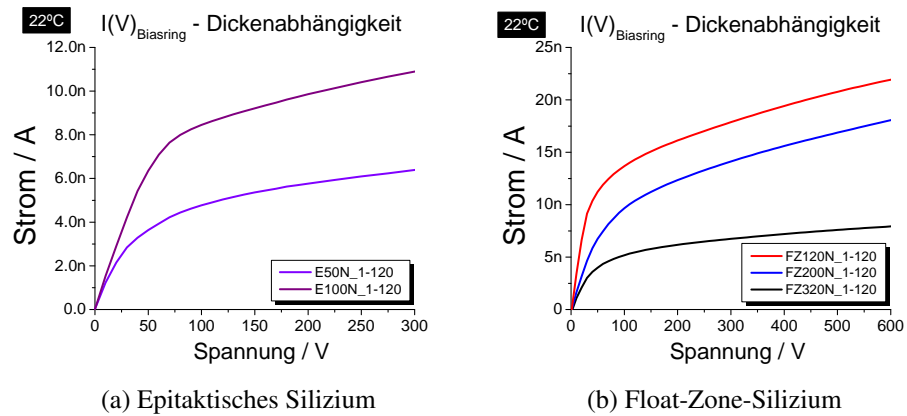


Abbildung 5.3: Abhängigkeit des Stromes des *Biasrings* von der Spannung für verschiedene Sensordicken und Substrate.

KAPITEL 5. MESSERGEBNISSE FÜR MPIX-SENSOREN

	FZ320N	FZ320P	FZ320Y
Strom [pA] @ +22 °C	4070,5 ± 69,2	4289,8 ± 234,7	4149,9 ± 179,2
Strom [pA] @ −20 °C	68,3 ± 3,6	72,1 ± 4,3	66,2 ± 2,6
Gemessen 22 °C / −20 °C	61,8 ± 4,1	59,9 ± 1,9	62,8 ± 1,2
Theorie 22 °C / −20 °C	62,1	62,1	62,1

Tabelle 5.1: In den ersten zwei Zeilen ist der Mittelwert des *Biasring*-Stromes von unbestrahlten Sensoren bei einer Feldstärke von $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ für eine Temperatur von 22 °C bzw. −20 °C angegeben. In den unteren Zeilen ist der gemessene und der mit Formel 2.8 berechnete Quotient des Stromes beider Temperaturen.

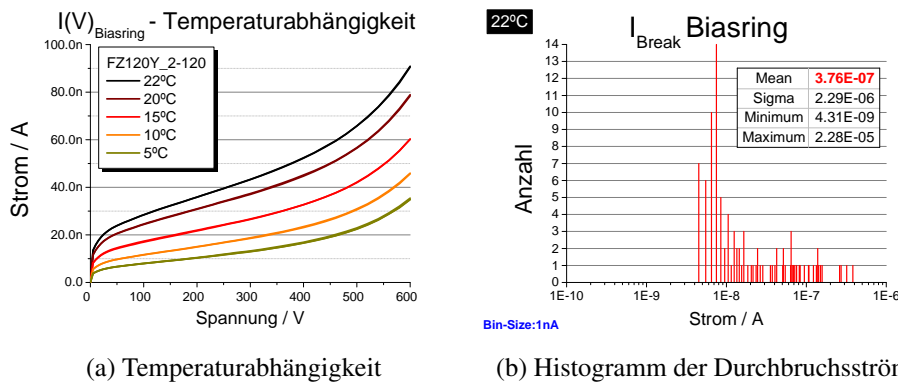


Abbildung 5.4: (a) Strom des *Biasrings* in Abhängigkeit der Spannung für verschiedene Temperaturen (b) Gemessene Ströme bei der Durchbruchspannung.

Temperaturabhängigkeit

Die Änderung des Stromes mit der Temperatur ist in der Abbildung 5.4a dargestellt. Die in Tabelle 5.1 gezeigte Abnahme des Stromes bei einer Temperatursenkung von 22 °C auf −20 °C entspricht für alle Sensoren der mit Formel 2.8 berechneten Abnahme. Aufgrund der zusätzlichen Defekte der Deep Diffusion wurde diese Untersuchung auch für die anderen Sensordicken durchgeführt. Wie Abbildung 5.4a zeigt, ist die Temperaturabhängigkeit des Stromes auch für den FZ120Y gleich den Erwartungen, weshalb Formel 2.8 für alle weiteren Diskussionen verwendet wird.

Durchbruchsspannung

Für alle Sensoren wurde, mit dem in Formel 4.2 beschriebenen Kriterium, die Durchbruchsspannung V_{Break} und der Strom bei dieser Spannung „ I_{Break} “ bestimmt, und die Ergebnisse in die Tabelle E.1 eingetragen.

Das Kriterium unterscheidet nicht zwischen einem abrupten Durchbruch, wie zum Beispiel bei Region 7-120 in Abbildung E.1, und einer schrittweisen Erhöhung des Stromanstieges mit der Spannung V_{Bias} , wie zum Beispiel bei Region 8-100 in der gleichen Abbildung.

Insgesamt sind 38 von 480 Regionen abrupt durchgebrochen und bei 139 gab es eine Erhöhung des Stromanstieges. Die meisten abrupten Durchbrüche gab es für die M200-Sensoren, wie in Tabelle E.2 gezeigt. Keine Durchbrüche gab es bei den FZ320N-, FZ200N- und FZ120P-Sensoren. Nach Bestrahlung wurde bei keinem Sensor ein Durchbruch gemessen.²

Die Durchbruchswahrscheinlichkeit ist für alle Sensorregion gleich. Wie Abbildung 5.4b zeigt, ist der Strom bei der Durchbruchsspannung für alle Sensortypen einige Nanoampere.

Für alle Sensortypen gab es in der untersuchten Stichprobe Sensoren, die für einen Sensoreinsatz ausreichend durchbruchsfest sind, allerdings gab es besonders bei den M200-Sensoren größere Probleme.

5.2.2 Ergebnisse für bestrahlte Sensoren

Abbildung 5.2b zeigt, dass nach Bestrahlung der Strom für Spannungen größer 100 V nur noch vom Pixelraster und der Regionsfläche abhängt. Der relative Anstieg des Stromes mit der Spannung hängt nur vom Substrat ab, wie Abbildung 5.5b zeigt. Vor Bestrahlung ist der Anstieg auch von der Technologie, der Sensordicke und der Region abhängig, wie ein Vergleich mit Abbildung 5.5a zeigt.

Für n-leitende Sensoren ist für Regionen mit einem Polysiliziumwiderstand die Spannungsabhängigkeit des Stromes ähnlich der vor Bestrahlung. Für Regionen mit einer *Punch-Through-Struktur* ist der Anstieg zunächst schwach und nimmt erst für Spannungen größer der, in Kapitel 5.10.1 ermittelten, *Punch-Through-Spannung* stärker zu. Für p-leitende Sensoren ist die Strom-Spannungs-Abhängigkeit für beide *Bias-Strukturen* gleich, wie Abbildung 5.5b verdeutlicht.

Wie Abbildung 5.6 zeigt, nimmt durch die Strahlenschäden der Dunkelstrom des *Biasrings* um einen Faktor 10^4 bis 10^5 zu. Der Anstieg ist abhängig von

- **Sensordicke** - Für 320 μm dicke Float-Zone-Siliziumsensoren ist er um einen Faktor drei größer als für 200 μm dicke Sensoren.
- **Substrat** - Für 200 μm dicke Magnetic-Czochralski-Siliziumsensoren ist er halb so groß wie für gleich dicke Float-Zone-Siliziumsensoren.

Der Anstieg ist unabhängig von der *Bias-Struktur*, dem Pixelraster und der Pixelgröße, wie die Tabelle E.3 zeigt. Der Anstieg des Stromes ist also lediglich vom Regionsvolumen und Ursprungssensormaterial abhängig. Dieses könnte darauf hindeuten, dass Schädigungen innerhalb des Sensormaterials eine größere Rolle spielen als oberflächennahe Defekte.

²Nur Sensoren, die vor Bestrahlung keine Durchbrüche hatten, wurden bestrahlt.

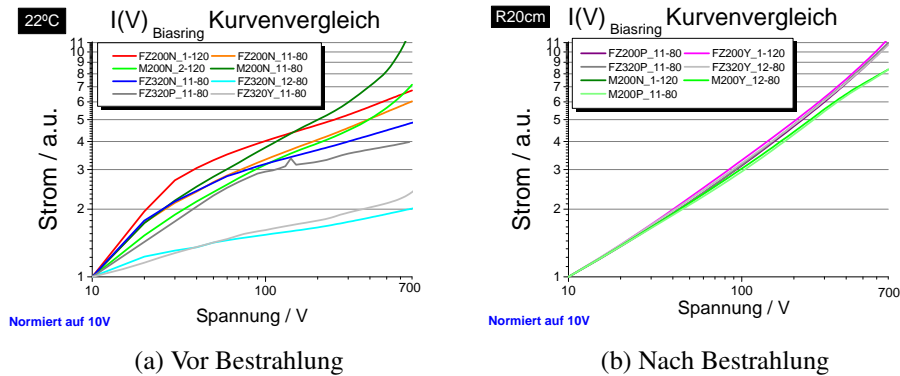


Abbildung 5.5: Vergleich des Stromanstieges des *Biasrings* als Funktion der Spannung vor bzw. nach Bestrahlung. Alle Ergebnisse wurden durch den Strom bei 10 V geteilt.

	Region	Länge [μm]	Bias- struktur	Spannung		Quotient
				-45 V	45 V	
FZ200P	1-120	2241	PT	-52.5 μA	7.30 μA	7.2
	2-120	2241	PS	-105.0 μA	8.05 μA	13.0
	6-80	2241	PS	-84.9 μA	5.54 μA	15.3
	7-120	1171	PT	-70.7 μA	7.00 μA	10.1
M200Y	5-80	2241	PT	-60.6 μA	6.00 μA	10.1
	6-80	2241	PT	-95.1 μA	6.19 μA	15.4

Tabelle 5.2: Aufgeführt ist der *Biasring*-Strom bei einer Spannung V_{Bias} von -45 bzw. 45 V für bestrahlte FZ200P- und M200Y-Sensoren für verschiedene Sensorregionen. In der letzten Spalte ist der Quotient beider Werte eingetragen.

Durchlassrichtung

Nach Bestrahlung können die Sensoren auch in Durchlassrichtung ohne einen Durchbruch betrieben werden. Dieses könnte für Anwendungen in besonders strahlungsbelasteten Detektorbereichen, z.B. nahe dem Wechselwirkungspunkt, interessant sein [35].

Wie Abbildung 5.7 zeigt, nimmt in Durchlassrichtung der Strom linear mit der Spannung zu. Der gemessene Strom steigt mit dem Raster an und ist größer für Regionen mit einem Polysiliziumwiderstand, verglichen mit Regionen mit einer *Punch-Through-Struktur*. Tabelle 5.2 zeigt das Verhältnis des Stromes bei gleichem Spannungsbetrag in Durchlass- und Sperrrichtung. Dieses ist unabhängig vom Sensortyp, steigt mit kleinerem Pixelraster an und ist größer für Regionen mit einer Polysiliziumwiderstand als für Regionen mit einer *Punch-Through-Struktur*. Der Schnittpunkt aus den Anstiegen in Durchlass- bzw. Sperrrichtung ist sensorunabhängig bei 0,6 V.

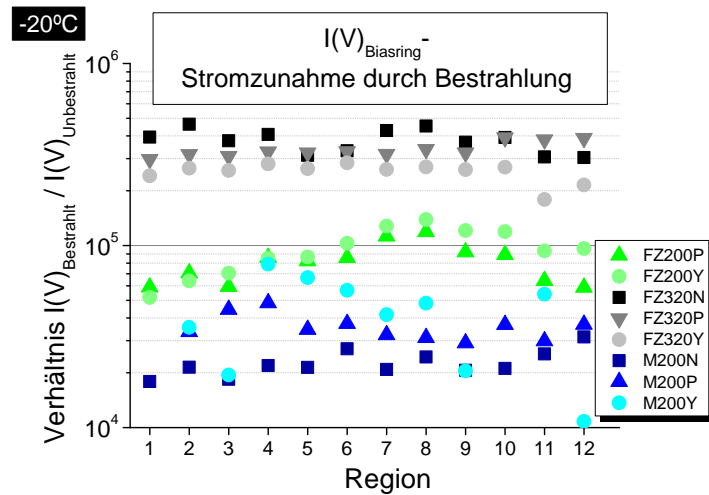


Abbildung 5.6: Stromzunahme des *Biasrings* durch Strahlenschäden. Dargestellt ist der Quotient des Stromes nach und vor Bestrahlung bei einem Feld $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ bei einer Temperatur von -20°C

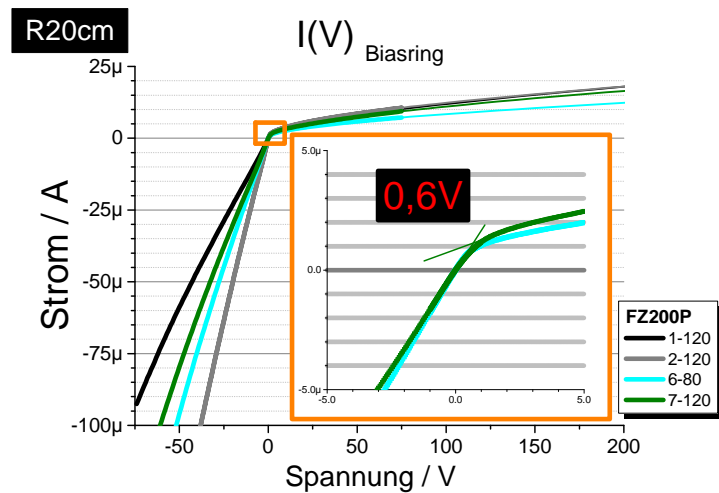


Abbildung 5.7: Strom des *Biasrings* in Durchlass- und Sperrrichtung. Strom des *Biasrings* in Abhängigkeit der Spannung. In der orangefarbenen Box ist der Spannungsbereich um 0 V vergrößert dargestellt.

5.3 Abhängigkeit der Biasring-Kapazität von der Spannung

5.3.1 Ergebnisse für unbestrahlte Sensoren

Die Kapazität des *Biasrings* zur Sensorrückseite in Abhängigkeit der Spannung V_{Bias} ist anhand des FZ320N-Sensors in Abbildung 5.8a gezeigt. Die Kapazität nimmt für Spannungen kleiner der Verarmungsspannung mit steigender Spannung ab. Die Kapazität des *Biasrings* bei einer Feldstärke von $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ ist einige 20 Picofarad. Die gemessenen Abhängigkeiten der Kapazität sind:

- **Bias-Struktur** - Die Kapazität ist für Regionen mit einer *Punch-Through-Struktur* $25 \pm 3\%$ kleiner als für Regionen mit einem Polysiliziumwiderstand.
- **Pixellänge** - Die Kapazität ist für Regionen mit kurzen Pixeln $25 \pm 2\%$ größer als für Regionen mit langen Pixeln.
- **Pixelraster** - Für ein Raster von $120 \mu\text{m}$ ist die Kapazität $8 \pm 1\%$ größer als für ein Raster von $100 \mu\text{m}$ und $19 \pm 3\%$ größer als für ein Raster von $80 \mu\text{m}$.
- **Sensordicke** - Die Kapazität der $100 \mu\text{m}$ Sensoren aus Epitaktisches Silizium ist 81% der Kapazität der $50 \mu\text{m}$ dicken Epi-Sensoren. Bei Float-Zone-Siliziumsensoren ist die Kapazität bei einer Dicke von $320 \mu\text{m}$ 72% verglichen mit einer Dicke von $200 \mu\text{m}$. Für die $200 \mu\text{m}$ und $120 \mu\text{m}$ dicken Sensoren ist der Unterschied weniger als 10% .

Die Kapazität ist unabhängig von dem Substrat und der Technologie.

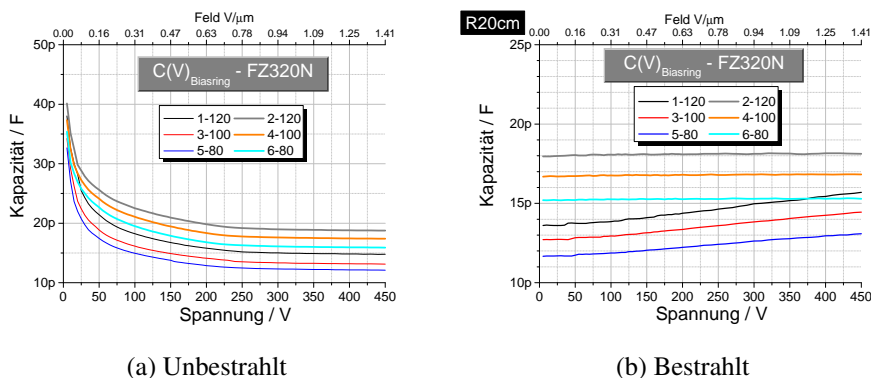


Abbildung 5.8: Abhängigkeit der Kapazität des *Biasrings* von der Spannung für den FZ320N-Sensortyp vor und nach Bestrahlung

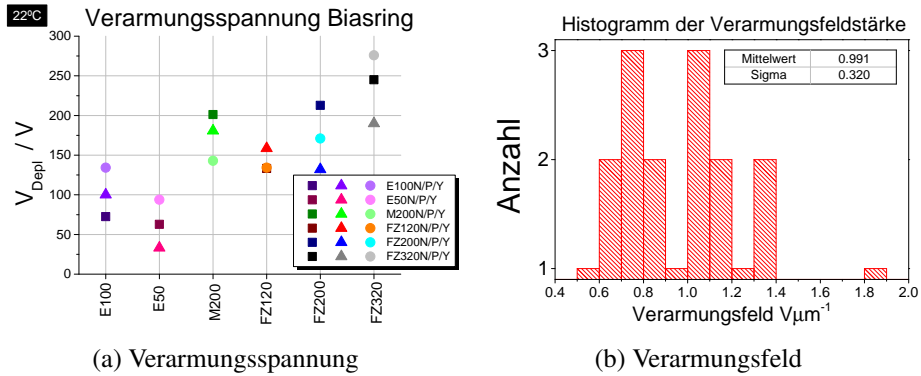


Abbildung 5.9: (a) Die aus den C(V)-*Biasring*-Messungen berechnete Verarmungsspannung
(b) Zeigt die aus der Verarmungsspannung ermittelte „**Verarmungs-Feldstärke**“

Verarmungsspannung

Die Verarmungsspannung wurde, mit dem in Kapitel 4.2.2 beschriebenen, Algorithmus bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.9a gezeigt und in der Tabelle E.7 zusammengefasst.

Für Sensoren aus epitaktischem Silizium ist die Verarmungsspannung für eine Sensordicke von $50 \mu\text{m}$ $76 \pm 4 \text{ V}$ und für $100 \mu\text{m}$ $110 \pm 5 \text{ V}$.

Für Float-Zone-Siliziumsensoren mit einer Dicke von $120 \mu\text{m}$ ist die Verarmungsspannung $143 \pm 3 \text{ V}$, für $200 \mu\text{m}$ dicke Sensoren $149 \pm 4 \text{ V}$ und für $320 \mu\text{m}$ dicke Sensoren $230 \pm 8 \text{ V}$. Das Verhältnis der Verarmungsspannungen von 320 und $200 \mu\text{m}$ dicken Sensoren entspricht dabei genau der Dickenzunahme.

Mit $168 \pm 5 \text{ V}$ ist die Verarmungsspannung von Sensoren aus Magnetic-Czochralski-Silizium in etwa gleich der $200 \mu\text{m}$ dicken Float-Zone-Siliziumsensoren.

Weitere Abhängigkeiten der Verarmungsspannung von anderen Sensorparametern wurden nicht gemessen. Die **Verarmungsfeldstärke**, definiert als Quotient aus Verarmungsspannung und Sensordicke, hat für alle Sensoren einen Mittelwert von $1 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$, wie in Abbildung 5.9b gezeigt ist. Aus diesem Ergebnis wurde für eine *over-depletion* die Referenzfeldstärke von $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ abgeleitet.

Temperaturabhängigkeit

Die Kapazität des *Biasrings* wurde für Temperaturen von 22 und -20°C gemessen. Wie die Abbildung 5.11b zeigt, ist die Kapazität, wie erwartet, unabhängig von der Temperatur.

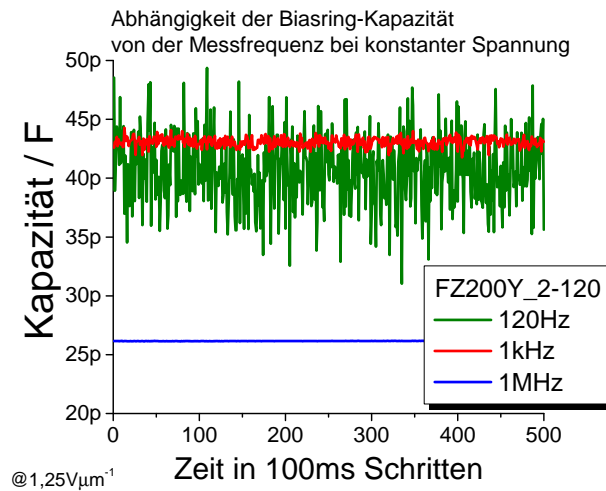


Abbildung 5.10: Dargestellt sind 500 Kapazitätsmessungen des Biasrings bei einer Feldstärke von $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ für verschiedene Kapazitäten

Frequenzabhängigkeit

Abbildung 5.10 zeigt die Kapazität des *Biasrings* für verschiedene Frequenzen. Wie erwartet [14, Fig. 3] ist die Kapazität für 120Hz und 1kHz gleich und nimmt für 1MHz ab. Dieses ist für beide *Bias-Strukturen* gleich.

5.3.2 Ergebnisse für bestrahlte Sensoren

Wie Abbildung 5.8b zeigt, hat nach Bestrahlung die Kapazität des *Biasrings* nur eine kleine Abhängigkeit von der Spannung V_{Bias} .

Abbildung 5.11a zeigt, dass die Kapazität für den FZ320N- und FZ320Y-Sensor gleich der vor der Bestrahlung bei voller Verarmung ist. Für die M200P und FZ200P dicken Sensoren und für den FZ320P-Sensor gibt es eine zwanzigprozentige Abnahme der Kapazität durch die Strahlungsschäden.

Es wurde für die Kapazitätsänderung durch Bestrahlung keine Abhängigkeit von der Pixellänge, dem Substrat, den *Bias-Strukturen*, dem Pixelraster oder der Sensordicke gemessen, d.h. dieser Effekt wurde nur für pStop Sensoren beobachtet.

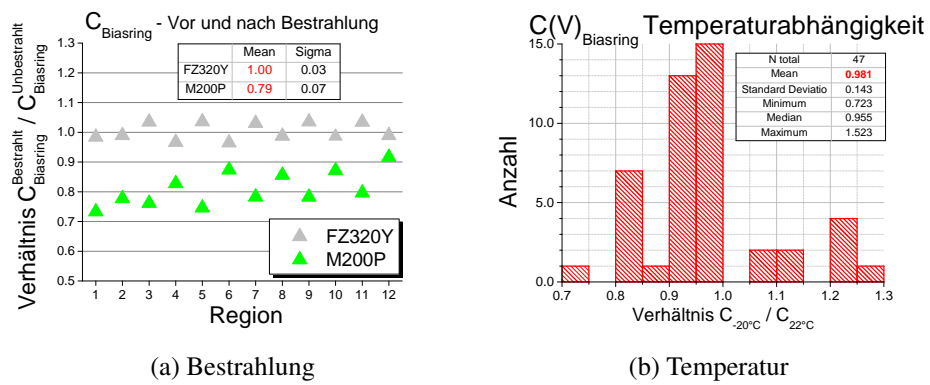


Abbildung 5.11: Änderung der Rückseitenkapazität des *Biasrings* durch Bestrahlung und bei einer Temperatursenkung von 22 °C auf –20 °C

5.4 Abhängigkeit des Dunkelstromes der Pixel als Funktion der Spannung

5.4.1 Ergebnisse für unbestrahlte Sensoren

Die Abhängigkeit des Pixelstromes von der Spannung ist anhand des FZ320N-Sensors in der Abbildung 5.12 gezeigt. Die Ströme in Sperrrichtung bei einer Feldstärke von $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ und einer Temperatur von 22°C sind einige Picoampere. Für Spannungen größer der Verarmungsspannung steigt der Strom weiter mit der Spannung. Dieser Effekt kann durch Band-zu-Band-Tunneleffekte beschrieben werden [132]. Die Abhängigkeiten des Pixelstromes sind:

- **Pixellänge** - Der Strom ist einen Faktor zwei größer für Regionen mit langen Pixeln als für Regionen mit kurzen Pixeln. Dieses entspricht somit genau der Änderung der Pixelfläche.
- **Pixelraster** - Der Strom nimmt mit dem Pixelraster zu. Der Anstieg ist für ein Raster von $120 \mu\text{m}$, verglichen mit einem Raster von $100 \mu\text{m}$ bzw. $80 \mu\text{m}$, $1,23 \pm 0,05$ bzw. $1,67 \pm 0,23$. Nach der Teilung durch das Pixelraster sind die Störme für alle Raster gleich mit $0,44 \pm 0,07$ und $0,20 \pm 0,03 \text{ pA}\mu\text{m}^{-1}$ für Regionen mit langen bzw. kurzen Pixeln.
- **Substrat** - Bei gleicher Dicke ist der Strom für die Sensoren aus Magnetic-Czochralski-Silizium etwa dreimal so groß wie für Sensoren aus Float-Zone-Silizium. Die Abhängigkeit vom Sensormaterial ist somit die gleiche wie beim Biasringstrom.
- **Sensordicke** - Der Strom von Sensoren auf epitaktischem Silizium ist für eine Dicke von $100 \mu\text{m}$ größer als für $50 \mu\text{m}$ dicke Sensoren. Der Strom für Sensoren aus Float-Zone-Silizium nimmt mit der Dicke ab. Auch diese Abhängigkeit wurde beim Biasringstrom gemessen.

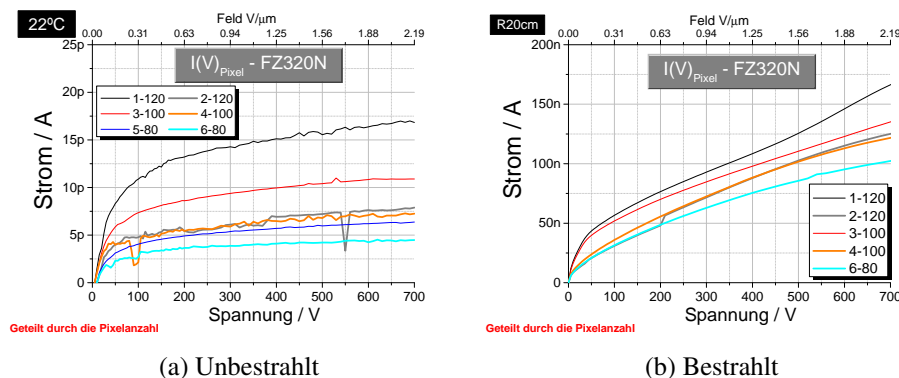


Abbildung 5.12: Die Spannungsabhängigkeit des Pixelstromes vor und nach Bestrahlung am Beispiel des FZ320N-Sensortyps.

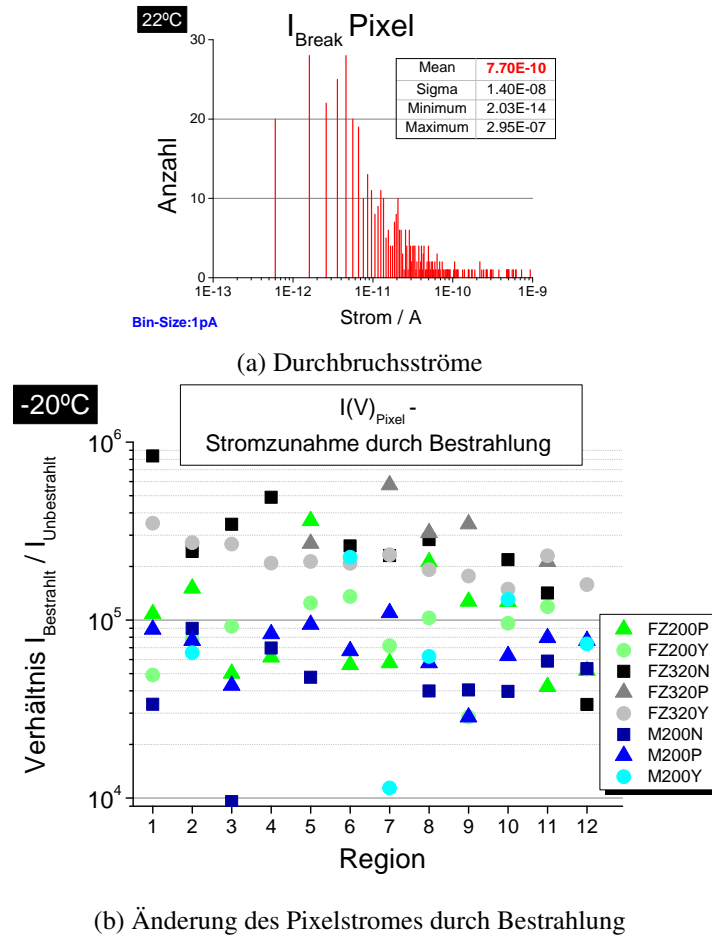


Abbildung 5.13: (a) Histogramm der gemessenen Ströme bei der Durchbruchspannung. (b) Dargestellt ist das Verhältnis des Stromes I_{Pixel} nach und vor Bestrahlung für eine Feldstärke von $1,25 \text{ V}/\mu\text{m}$ und einer Temperatur von -20°C

Der Strom ist unabhängig von der *Bias-Struktur* und der Technologie.

Bestimmung der Durchbruchspannung

Die Durchbruchspannung wurde, mittels des durch Formel 4.2 beschriebenen, Kriteriums bestimmt und die Ergebnisse in Tabelle E.4 eingetragen. Die Durchbruchswahrscheinlichkeit ist für alle Regionen gleich. Der in Abbildung 5.13a gezeigte Strom bei der Durchbruchspannung hat die Größe von einigen Nanoampere.

Temperaturabhängigkeit

Es wurde der Strom der Pixel für eine Temperatur von +22 und $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessen. Aufgrund der temperaturbedingten Stromabnahme ist der Strom bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sehr klein und an der Auflösungsgrenze der Messgeräte. Die über alle Sensortypen gemittelte Abnahme ist $66,9 \pm 15,3$ und somit verträglich mit der von der Formel 2.8 abgeleiteten Erwartung von 62,1.

5.4.2 Ergebnisse für bestrahlte Sensoren

Abbildung 5.12b zeigt, dass nach Bestrahlung der Strom für Spannungen unterhalb von 100 V stark mit der Spannung ansteigt. Für größere Spannungen wird der Anstieg nahezu linear.

Änderungen durch Bestrahlung

Die Zunahme des Stromes durch die Strahlenschäden ist in Abbildung 5.13b gezeigt. Die Zunahme hat eine Größe von 10^4 bis 10^5 . Die Mittelwerte der Änderungen für alle Sensortypen sind in der Tabelle E.5 angegeben. Der Anstieg ist einen Faktor fünf höher für Sensoren aus Float-Zone-Silizium mit einer Dicke von $320\text{ }\mu\text{m}$ verglichen mit Sensoren einer Dicke von $200\text{ }\mu\text{m}$. Der Anstieg für Sensoren aus Magnetic-Czochralski-Silizium ist kleiner als für Sensoren aus Float-Zone-Silizium. Es gibt keinen Einfluß von der Pixellänge, dem Pixelraster und der *Bias-Struktur*.

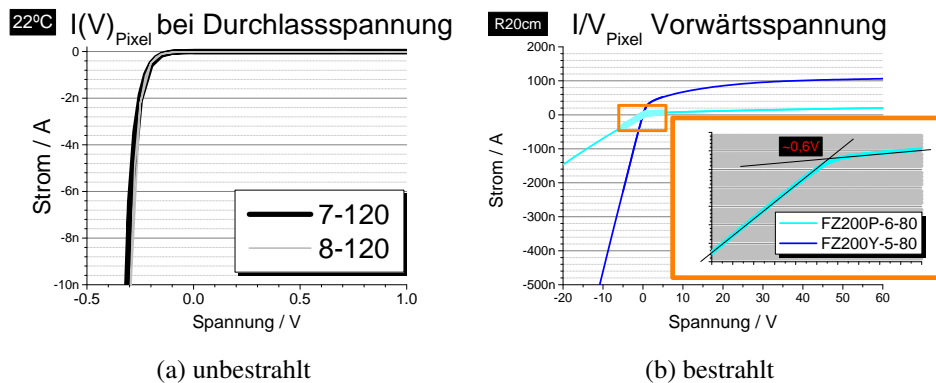


Abbildung 5.14: **Der Pixelstrom bei Durchlassspannung.** Dargestellt ist der Pixelstrom für einen unbestrahlten und einen bestrahlten Sensor unter Durchlassspannung.

Durchlassspannung

Vor Bestrahlung tritt das erwartete Durchbruchverhalten einer Diode auf, wie es in Abbildung 5.14a gemessen wurde. Abbildung 5.14b zeigt, dass nach Bestrahlung der Strom linear mit der Spannung steigt. Der Strom steigt mit dem Pixelraster an und ist größer für p-leitende Sensoren als für n-leitende Sensoren. Ebenso ist er größer für Regionen mit einer *Punch-Through-Struktur* als für Regionen mit einem Polysiliziumwiderstand. Die Abhängigkeit vom Biaswiderstand ist somit genau umgekehrt wie beim Biasring, d.h. bei der *Punch-Through-Struktur* fließt ein höherer Anteil des Dunkelstroms über den Pixel ab.

5.4.3 Einfluss der Messmethode

Abbildung 5.15a zeigt, dass nach Teilung durch die Pixelanzahl, der gemessene Strom gleich ist, wenn auf einem, zwei oder drei Pixel gleichzeitig gemessen wird. Auch ist der Strom unabhängig davon, ob bei der Messung von einem Pixel die Nachbapixel nicht kontaktiert oder auf Masse gelegt sind, wie Abbildung 5.15b zeigt.

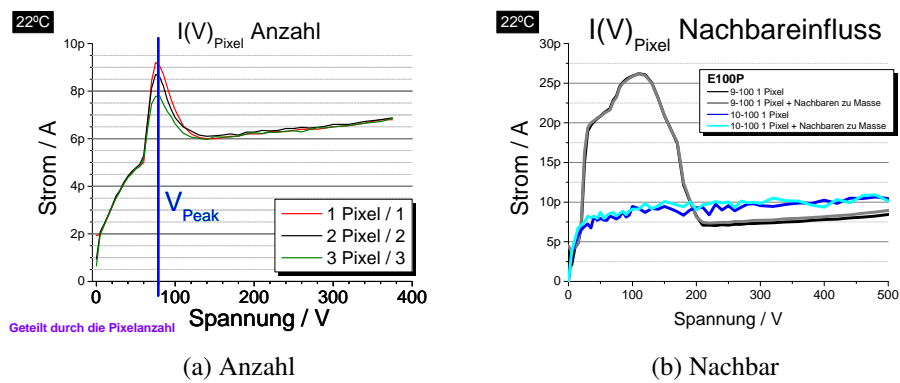


Abbildung 5.15: (a) Zeigt die Ergebnisse für die gleichzeitige Messung von einem, zwei und drei Pixel. (b) Zeigt eine Messung eines Pixel mit und ohne Kontakt der Nachbarpixel zur Masse.

5.5 Abhängigkeit des Pixelkapazität von der Spannung

5.5.1 Ergebnisse für unbestrahlte Sensoren

Die Pixelkapazität in Abhängigkeit von der Spannung ist in Abbildung 5.16 für den FZ320N-Sensortyp gezeigt. Abbildung 5.16a zeigt, dass vor der vollständigen Verarmung des Sensors die Kapazität mit steigender Spannung abnimmt. Die Pixelkapazität ist bei einer Feldstärke von $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ einige 100 Femtofarad und hängt von folgenden Parametern ab:

- **Bias-Struktur** - Die Kapazität für Regionen mit einer *Punch-Through-Struktur* ist $12 \pm 3\%$ größer als für Regionen mit einem Polysiliziumwiderstand.
- **Pixellänge** - Die Kapazität ist für Regionen mit langen Pixeln $41 \pm 5\%$ größer als für Regionen mit kurzen Pixeln.
- **Pixelraster** - Für ein Raster von $120 \mu\text{m}$ ist die Kapazität $20 \pm 2\%$ größer als für ein Raster von $80 \mu\text{m}$ und $7 \pm 4\%$ größer als für ein Raster von $100 \mu\text{m}$.
- **Sensordicke** - Die Kapazität von Sensoren aus $100 \mu\text{m}$ dickem epitaktischen Silizium ist 74% der Kapazität von Sensoren aus $50 \mu\text{m}$ dicken epitaktischen Silizium. Für Sensoren aus $320 \mu\text{m}$ dicken Float-Zone-Silizium ist die Kapazität 73% der Kapazität von Sensoren aus $200 \mu\text{m}$ dickem Float-Zone-Silizium. Für die $200 \mu\text{m}$ und $120 \mu\text{m}$ Sensoren gibt es nur einen geringen Einfluß von der Sensordicke ($<10\%$).

Die Pixelkapazität ist unabhängig von der Technologie und dem Substrat.

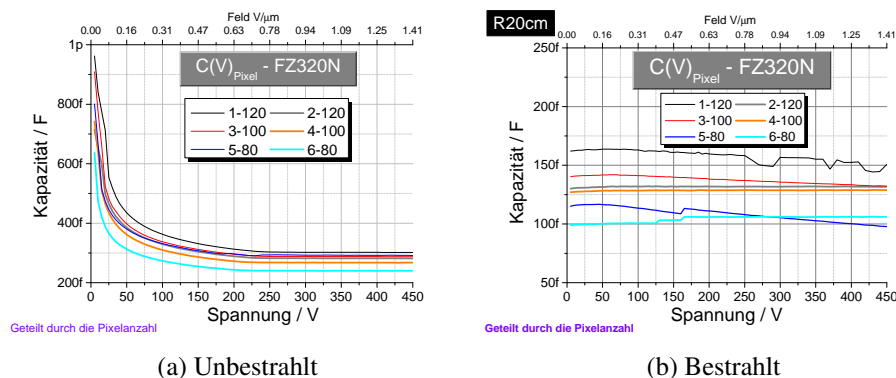


Abbildung 5.16: Pixelkapazität zur Sensorrückseite in Abhängigkeit von der Spannung für den FZ320N-Sensortyp vor und nach Bestrahlung

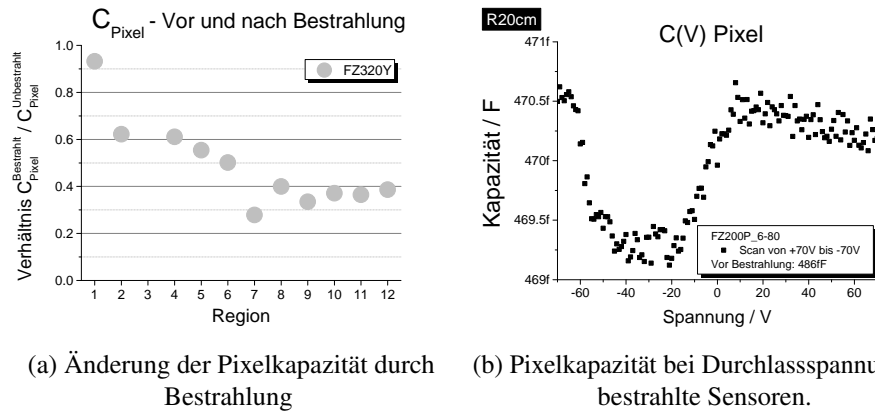


Abbildung 5.17: a) Verhältnis der Pixelkapazität nach und vor Bestrahlung bei einer Feldstärke von $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$
b) Kapazität des Pixels bei Durchlass- und Sperrspannung

Verarmungsspannung

Die Verarmungsspannung wurde mit dem, in Kapitel 4.2.2 beschriebenen, Algorithmus bestimmt.

Für Sensoren aus epitaktischem Silizium ist die Verarmungsspannung für eine Sensordicke von $50 \mu\text{m}$ $48 \pm 4 \text{ V}$ und für eine Dicke von $100 \mu\text{m}$ $87 \pm 4 \text{ V}$.

Für Float-Zone-Siliziumsensoren steigt die Verarmungsspannung mit der Dicke. Für $120 \mu\text{m}$ dicke Sensoren ist sie $83 \pm 6 \text{ V}$, für $200 \mu\text{m}$ dicke Sensoren $135 \pm 3 \text{ V}$ und für $320 \mu\text{m}$ dicke Sensoren $200 \pm 8 \text{ V}$. Mit einem Wert von $134 \pm 5 \text{ V}$ ist die Verarmungsspannung von Sensoren aus Magnetic-Czochralski-Silizium und gleich der von $200 \mu\text{m}$ dickem Float-Zone-Siliziumsensoren.

5.5.2 Ergebnisse für bestrahlte Sensoren

Abbildung 5.16b zeigt, dass die Kapazität nach Bestrahlung nahezu spannungsunabhängig ist. Durch die Strahlungsschäden nimmt die Kapazität um bis zu 60% ab, wie Abbildung 5.17a zeigt. Die Abnahme ist für $320 \mu\text{m}$ dicke Sensoren kleiner als für $200 \mu\text{m}$ dicke Sensoren. Die Änderung hängt nicht vom Substrat, der *Bias-Struktur* und dem Pixelraster ab.

Durchlassrichtung

Abbildung 5.17b zeigt, dass die Kapazität auch in Durchlassrichtung spannungsunabhängig ist und den gleichen Wert wie in Sperrrichtung hat.

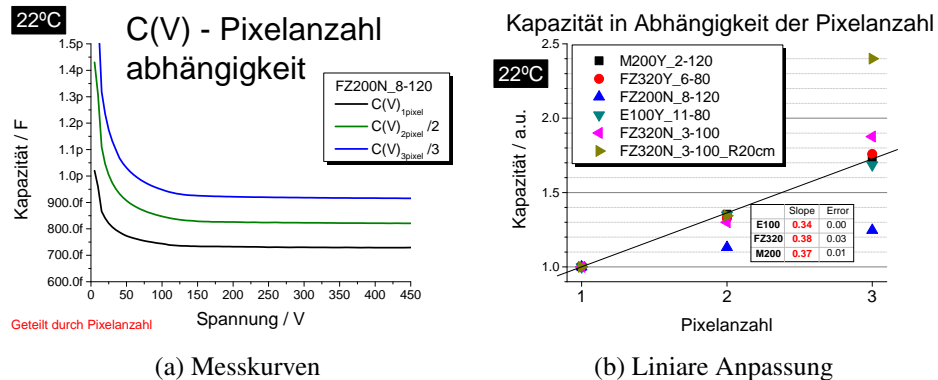


Abbildung 5.18: **Einfluss der Anzahl der Pixel zu denen parallel gemessen wird.** (a) Zeigt die Messkurven geteilt durch die Pixelanzahl. (b) Zeigt für verschiedene Sensortypen und Sensorregionen die Kapazität bei einem Verarmungsfeld von $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ für bestrahlte und unbestrahlte Sensoren in Abhängigkeit der Pixelanzahl. Zur Vergleichbarkeit wurden alle Werte auf die Kapazität der Einpixelmessung bezogen. Für die ein und zwei Pixelmessungen wurden alle Pixelkombinationen der drei Pixel mit gleichem Ergebnis untersucht.

5.5.3 Einfluss der Messmethode

Abbildung 5.18a zeigt den Einfluß der Anzahl der Pixel, zu denen parallel gemessen wird. Die Kapazität nimmt mit der Pixelanzahl zu. Der Anstieg der Kapazität mit der Pixelanzahl ist, entgegen der Erwartungen für die Parallelschaltung von Kapazitäten, nicht gleich der Pixelanzahl, sondern ein Faktor 0,35 pro Pixel für alle Sensortypen vor und nach Bestrahlung, wie Abbildung 5.18b zeigt. Dieses ist unabhängig von der Sensordicke und dem Pixelraster. Die gemessenen Kapazitäten sind auch gleich, wenn zwischen den gemessenen Pixeln ein Pixel nicht kontaktiert wird.

5.6 Vergleich der Ergebnisse der *Biasring*- und Pixelmessungen

5.6.1 Temperaturabhängigkeit

Die Strom- und Kapazitätsmessungen des *Biasrings* und der Pixel wurden jeweils bei einer Temperatur von 22 und $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ durchgeführt.

Für die Strommessungen des *Biasrings* wurde eine Abnahme um den Faktor $61,6 \pm 1,6$ gemessen. Für die Pixelmessungen war der Wert $66,9 \pm 15,3$. Beide Werte sind somit verträglich mit der, aus Formel 2.8 abgeleiteten, Erwartung von 62,1.

Für die Kapazität wurde, wie erwartet [30], weder für den *Biasring* noch für die Pixel eine Temperaturabhängigkeit gemessen.

5.6.2 Strom-Messungen

Verhältnis zwischen dem *Biasring*- und Pixelstrom

Das Verhältnis zwischen dem *Biasring*- und dem Pixelstrom ist in der Tabelle E.6 nach Bestrahlung aufgeführt. Das Verhältnis entspricht der Pixelanzahl von 256 für Regionen mit langen Pixeln bzw. 512 für Regionen mit kurzen Pixeln.

Geometrieinfluß

Die Abhängigkeit des *Biasring*- und des Pixelstromes vom Pixelraster ist, aufgrund des gleich bleibenden Verhältnisses aus Raster und Pixelbreite, für beide Messungen gleich und entspricht der aus dem Raster erwarteten Abnahme.

Weder für den Pixel- noch für den *Biasring*-Strom wurde ein Einfluß von der *Bias-Struktur* gemessen.

Der Strom für Regionen mit langen Pixeln ist beim *Biasring* unabhängig von der Pixellänge. Bei Pixeln ist der Strom einen Faktor zwei größer als für Regionen mit langen Pixeln. Dieses ist als reiner Geometrieeffekt zu verstehen.

Material- und Technologieeinfluß

Vor Bestrahlung ist für die Pixel und den *Biasring* der Strom für die Sensoren aus Magnetic-Czochralski-Silizium einen Faktor 2,7 bzw. 2,8 größer als für Sensoren aus Float-Zone-Silizium. Auch die Abhängigkeit des Stromes von der Dicke für Sensoren aus Float-Zone-Silizium ist für beide Messungen gleich und vergleichbar mit anderen Untersuchungen [79].

	Biasring	Pixel
PT	$0,0026 \pm 0,0007$	$0,0030 \pm 0,0006$
PS	$0,0018 \pm 0,0010$	$0,0081 \pm 0,0040$

Tabelle 5.3: Aufgeführt sind für 500 Strommessungen bei konstanter Spannung, die durch den Mittelwert geteilte Standardabweichung für Regionen mit einer *Punch-Through-Struktur* (PT) bzw. einem Polysiliziumwiderstand (PS). Eine Beispielmessung ist in der Abbildung E.2 gezeigt.

Stromrauschen

Das Rauschen des Stromes ist vor Bestrahlung am *Biasring* für die Regionen mit einer *Punch-Through-Struktur* größer, wie Tabelle 5.3 zeigt. Bei den Pixeln ist das Rauschen für Regionen mit einem Polysiliziumwiderstand größer. Für den Sensorbetrieb ist ein kleines Stromrauschen an den Pixeln vorteilhaft. Ein Erklärungsansatz ist das durch die *Bias-Struktur* verursachte Widerstandsrauschen [76, Formel 1.31].

$$Rauschen \propto \sqrt{\frac{Konstante}{R_p}} \quad (5.1)$$

Nach Bestrahlung ist das Rauschen durch das Temperaturrauschen des Chucks bestimmt und für den Biasring- und den Pixelstrom jeweils $0,0014 \pm 0,0003$.

Durchbruchsspannung

Die Durchbruchsspannung wurde mittels des durch Formel 4.2 beschriebenen Kriteriums bestimmt. Der Durchbruch ist für Pixel- und *Biasring*-Messungen unabhängig von der Sensorregion. Die Durchbruchsspannung ist für Pixel im Mittelwert etwa einen Faktor zwei kleiner als beim *Biasring*, wie der Vergleich der Tabellen E.1 und E.4 zeigt. Der Strom bei der Durchbruchsspannung ist, verglichen mit dem Biasring, bei den Pixeln um genau die Pixelanzahl reduziert.

Volumenstrom

Für den *Biasring* und die Pixel wurden der Volumenstrom vor und nach Bestrahlung berechnet. Bei allen Regionen eines Sensors ist der Volumenstrom gleich. Wie Tabelle 5.4 zeigt, stimmt der Volumenstrom von Pixeln und *Biasring* auch nach Bestrahlung für alle Sensortypen gut überein.

Bestrahlung

Der Anstieg des Stromes durch die Strahlenschäden ist für die Pixel und den *Biasring* identisch. Der Anstieg ist für Sensoren aus 320 µm dickem Silizium stärker als für 200 µm dicke Sensoren. Für Sensoren aus Magnetic-Czochralski-Silizium ist der Anstieg kleiner als für Sensoren aus Float-Zone-Silizium gleicher Dicke.

Pixel	Unbestrahlt [μAcm^{-3}]	Bestrahlt [mAcm^{-3}]	BR	Unbestrahlt [μAcm^{-3}]	Bestrahlt [mAcm^{-3}]
FZ200P	1.24	1.62	FZ200P	0.98	1.21
FZ200Y	1.30	1.57	FZ200Y	0.82	1.19
FZ320N	0.53	1.21	FZ320N	0.22	1.28
FZ320P	1.24	1.70	FZ320P	0.98	1.21
FZ320Y	1.30	1.14	FZ320Y	0.82	0.89
M200N	2.67	2.13	M200N	2.16	1.69
M200P	1.68	1.81	M200P	2.25	1.32
M200Y	10.65	1.59	M200Y	1.40	1.34
Mittelwert	1.35 ± 0.21	1.60 ± 0.11	Mittelwert	1.29 ± 0.49	1.27 ± 0.08

Tabelle 5.4: Volumenstrom der Pixel und des *Biasrings* (BR) vor und nach Bestrahlung. Dargestellt ist der Quotient der Mittelwerte der Ströme der entsprechenden Sensorgruppen

5.6.3 Kapazitätsmessungen

Geometrieinfluß

Die Pixelkapazität ist für Regionen mit langen Pixeln $41 \pm 5\%$ größer als für Regionen mit kurzen Pixeln. Beim Biasring ist diese Abhängigkeit etwa einen Faktor zwei kleiner. Die Abhängigkeiten vom Raster sind für die Biasring- und die Pixelkapazität gleich. Für ein Raster von $120 \mu\text{m}$ ist die Kapazität etwa 10% größer als für ein Raster von $100 \mu\text{m}$ und 20% größer als für ein Raster von $80 \mu\text{m}$.

Auch ist die Abhängigkeit von der Sensordicke für beide Messungen gleich. Bei Sensoren aus epitaktischen Silizium ist die Abnahme etwa 20% für $100 \mu\text{m}$ dicke Sensoren verglichen mit $50 \mu\text{m}$ dicken Sensoren. Für Float-Zone-Siliziumsensoren nimmt die Kapazität für eine Sensordicke von $320 \mu\text{m}$, verglichen mit einer Dicke von $200 \mu\text{m}$, um 30% ab. Für die $200 \mu\text{m}$ und $120 \mu\text{m}$ dicken Sensoren ist der Unterschied weniger als 10%. Für alle Messungen ist die Abhängigkeit von der Sensorgeometrie kleiner, als sich aus einem Plattenkondensatormodell ableiten lässt. Daraus kann man schließen, dass die gemessene Kapazität auch von anderen Kapazitäten, wie z.B. die Kapazität der *Bias-Strukturen* und der Zwischenpixelkapazitäten beeinflusst wird.

Material- und Technologieinfluß

Die Kapazität ist für Float-Zone-Silizium und Magnetic-Czochralski-Silizium gleich und unabhängig von der Technologie.

Verarmungsspannung

Mit der in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Methode wurde die Verarmungsspannung bestimmt und die Ergebnisse für den *Biasring* und die Pixel in Tabelle E.7 verglichen. Der aus den Pixelmessungen bestimmte Wert ist 20% kleiner als der Wert aus den *Biasring*-Messungen. Ein Vergleich mit den mittels Formel 2.32 berechneten Werten zeigt nur für die 320 μm dicke Sensoren eine gute Übereinstimmung. Bei dünneren Sensoren wurden zu hohe Werte gemessen.

Bestrahlung

Nach Bestrahlung ist die Kapazität des *Biasrings* und der Pixel kleiner als zuvor. Wie Tabelle E.8 zeigt, ist die gemessene Kapazitätsabnahme für die Pixelmessung einen Faktor zwei größer als beim *Biasring*.

5.7 Messung des Zwischenpixelwiderstandes

Die Messungen des Stromes zwischen zwei Pixeln in Abhängigkeit der eingepprägten Spannung sind exemplarisch für den FZ320N-Sensortyp in der Abbildung 5.19 dargestellt. Aufgrund des in Kapitel 4.2.5 beschriebenen Messaufbaus werden die addierten Ströme der Zwischenpixelwiderstandsmessung und dem, von der Spannung V_{Bias} resultierenden, Pixelstrom gemessen. Nach Bestrahlung ist der Strom daher mehrere Größenordnungen höher. Die, durch die Messspannung ausgelöste Zwischenpixelstromänderung, ist vor und nach Bestrahlung linear mit der Spannung. Aus den Messungen wurde mittels linearer Regression der Zwischenpixelwiderstand R_{int} bestimmt. Die obere Analysegrenze war dabei, aufgrund des begrenzten Auflösungsvermögens der verwendeten Amperemeters, 100 T Ω .

5.7.1 Ergebnisse für unbestrahlte Sensoren

Der Zwischenpixelwiderstand ist für alle Sensortypen und Regionen größer als 100 G Ω . Der Widerstand ist für Regionen mit einer *Punch-Through-Struktur* einen Faktor 5 ± 6 größer als für Regionen mit einem Polysiliziumwiderstand. Es wurde keine Abhängigkeit von der Pixelgeometrie, der Technologie und dem Substrat gemessen.

Temperaturabhängigkeit

Abbildung 5.20a zeigt ein Histogramm der Verhältnisse des Zwischenpixelwiderstands bei einer Temperatur von -20 und +22 °C für alle unbestrahlte Sensoren. Der Mittelwert ist 4,81 bei einer Standardabweichung von 8,15.

Hochspannungstest der Pixelisolation

Abbildung 5.20b zeigt, dass die Zwischenpixelisolation auch bis zu einer Messspannung von 40 V gegeben ist.

5.7.2 Ergebnisse für bestrahlte Sensoren

Wie Abbildung 5.19 zeigt, ist nach Bestrahlung der Zwischenpixelwiderstand kleiner als davor. Die Abnahme des Widerstandes ist drei Größenordnungen. Sie ist einen Faktor drei größer für Regionen mit langen Pixeln als für Regionen mit kurzen Pixeln. Die Abnahme ist für 200 μm dicke p-leitende Sensoren aus Float-Zone-Silizium und Magnetic-Czochralski-Silizium gleich. Für 320 μm dicke Sensoren aus Float-Zone-Silizium ist die Abnahme 60% größer als für die 200 μm dicke Sensoren. Auch nach Bestrahlung ist der Zwischenpixelwiderstand für alle Sensortypen größer 1 G Ω .

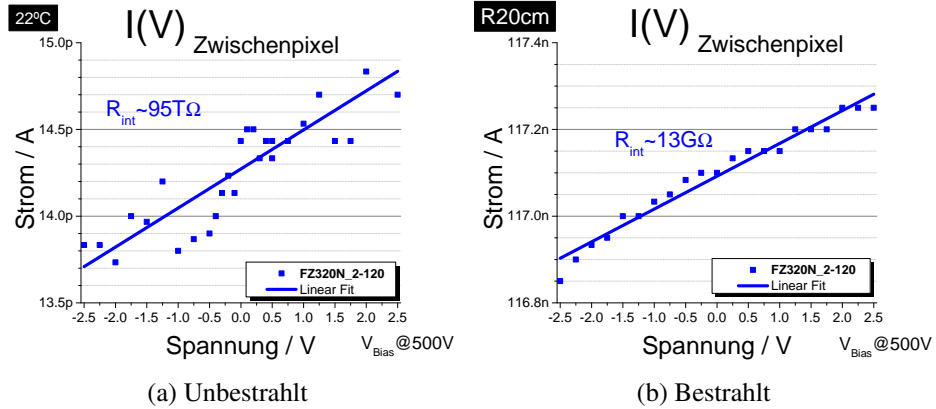


Abbildung 5.19: Der Strom zwischen zwei Pixeln als Funktion der Messspannung für den FZ320N-Sensortyp vor und nach Bestrahlung

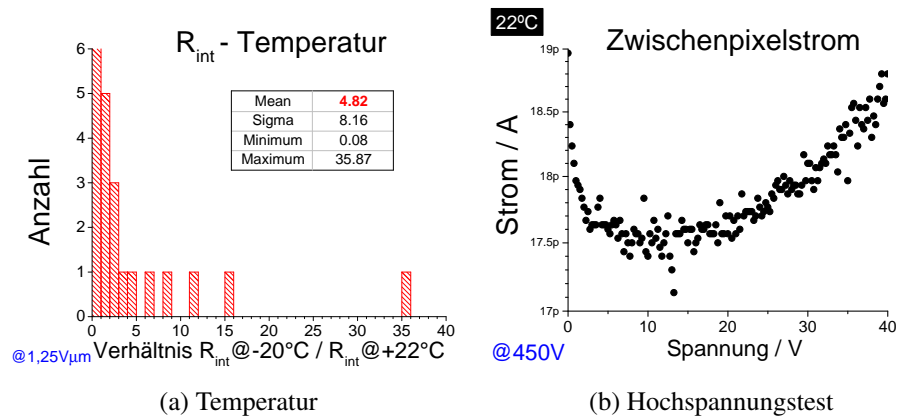


Abbildung 5.20: (a) Abgebildet ist das Verhältnis der Zwischenpixelwiderstände bei -20 und +22 °C Grad für unbestrahlte Sensoren. (b) Messungen der Zwischenpixelisolation für hohe Spannungen

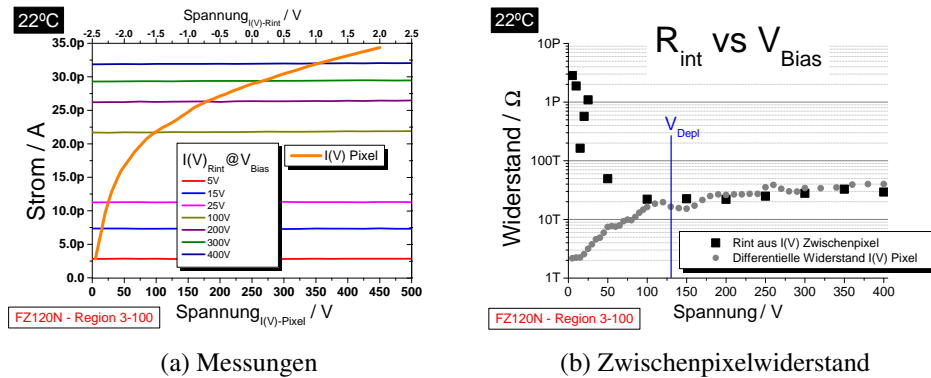


Abbildung 5.21: (a) zeigt Zwischenpixelwiderstandsmessungen für verschiedene Spannungen V_{Bias} und die Strom-Spannungs-Messung des entsprechenden Pixels.
 (b) Der aus den Zwischenpixelwiderstandsmessungen berechnete Zwischenpixelwiderstand und der, aus der Strom-Spannungs-Messung des Pixels berechnete, differentielle Widerstand. Gekennzeichnet ist ebenfalls die Verarmungsspannung V_{Depl}

Abhängigkeit von der Betriebsspannung

Durch den, in Abbildung 4.6a gezeigten, Messaufbau ist der gemessene Strom die Summe aus dem Pixelstrom und dem Zwischenpixelstrom, wie Abbildung 5.21a zeigt. Die gemessene Änderung des Stromes ist in der Größenordnung der durch die Messspannung verursachten Änderung des Pixelstromes. Abbildung 5.21b zeigt die Abhängigkeit des Zwischenpixelwiderstandes von der Spannung V_{Bias} . Zusätzlich ist der, aus der Spannungsabhängigkeit des Pixelstromes berechnete, differentielle Widerstand eingetragen. Für Spannungen größer der Verarmungsspannung sind beide gleich groß, von daher ist der gemessene Zwischenpixelwiderstand nur eine Mindestabschätzung für die Zwischenpixelisolation.

Wie Abbildung 5.22 zeigt, steigt der Zwischenpixelwiderstand nach Bestrahlung bis zu einer Spannung von 100 V über mehrere Größenordnungen an. Für größere Spannungen ist die Messung vom Untergrund des Pixelstromes dominiert. Dieses ist unabhängig von der Technologie, dem Substrat, dem Pixelraster und der Pixellänge. Der Zwischenpixelwiderstand nimmt in Druchlassrichtung ab, bleibt aber auch bei Spannungen von bis zu -25 V größer als einige Megaohm, wie Abbildung 5.22 zeigt.

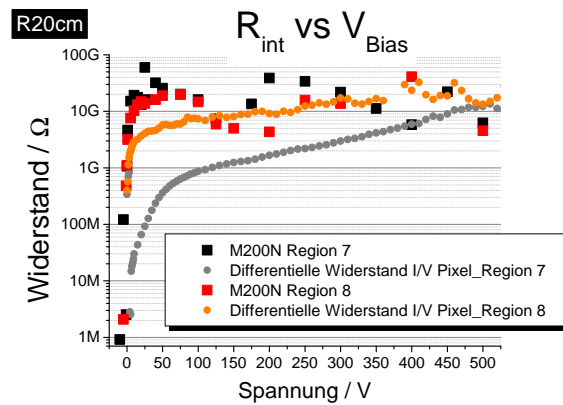


Abbildung 5.22: Abhängigkeit des Zwischenpixelwiderstandes von der Spannung V_{Bias} für den bestrahlten M200N-Sensor. Abgebildet ist neben dem Zwischenpixelwiderstand auch der, aus den I(V)-Pixel-Messungen, berechnete differentielle Widerstand.

5.8 Messung der Zwischenpixelkapazität in Abhängigkeit von der Spannung

5.8.1 Ergebnisse für unbestrahlte Sensoren

Abbildung 5.23 zeigt die Abhängigkeit der Zwischenpixelkapazität von der Spannung am Beispiel des FZ320N-Sensors. Die Zwischenpixelkapazität nimmt zunächst mit steigender Spannung zu. Für Spannungen größer der Verarmungsspannung ist die Kapazität nahezu spannungsunabhängig. Die Zwischenpixelkapazität ist bei einer Feldstärke von $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ einige zehn Femtofarad und hängt von folgenden Parametern ab:

- **Bias-Struktur** - Die Zwischenpixelkapazität ist, durch die höhere Kapazität der *Punch-Through-Struktur*, für Regionen mit einer *Punch-Through-Struktur* $23 \pm 3\%$ größer als für Regionen mit einem Polysiliziumwiderstand.
- **Pixellänge** - Die Zwischenpixelkapazität ist für Regionen mit langen Pixeln einen Faktor $2,19 \pm 0,04$ größer, als für Regionen mit kurzen Pixeln. Aus der Pixellänge ergibt sich der Faktor 2,07.
- **Pixelraster** - Die Zwischenpixelkapazität nimmt mit $1/\text{Pixelraster}$ ab. Die gemessenen Abnahmen von $0,68 \pm 0,08$ und $0,83 \pm 0,04$ für ein Raster von $120 \mu\text{m}$ verglichen mit einem Raster von $80 \mu\text{m}$ bzw. $100 \mu\text{m}$ ist gleich den, aus dem Raster, erwarteten Abnahmen von 0,67 bzw. 0,83.
- **Sensordicke** - Die Zwischenpixelkapazität nimmt um einige Prozent mit der Dicke zu. Dieses ist konsistent mit Untersuchungen an den Streifensensoren der HPK-Kampagne [69].

Die Zwischenpixelkapazität hängt nicht vom Substrat und der Technologie ab.

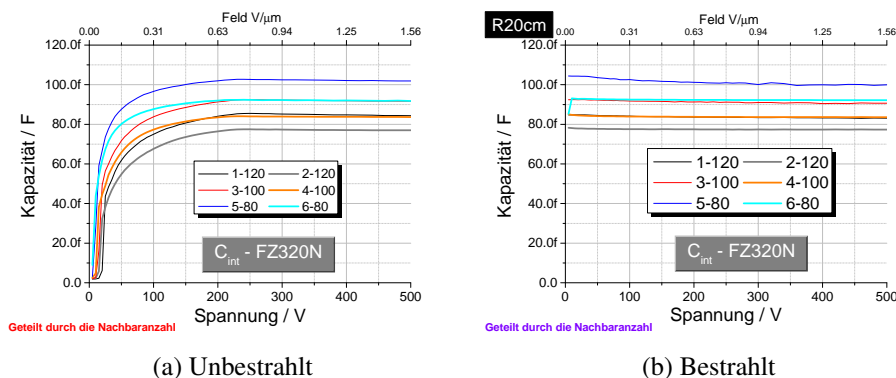
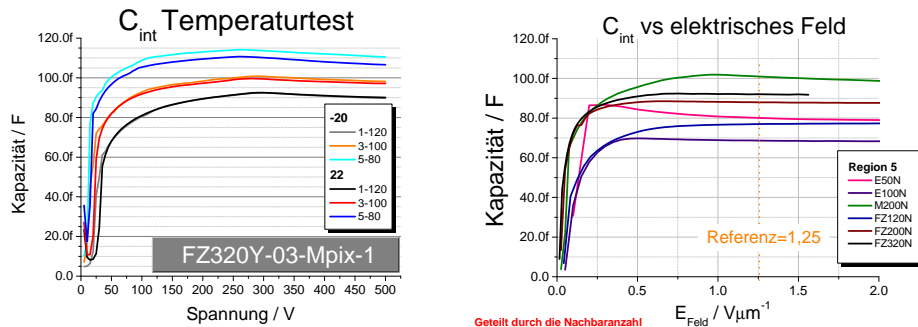


Abbildung 5.23: Die Zwischenpixelkapazität in Abhängigkeit von der Spannung am Beispiel des FZ320N-Sensors vor und nach Bestrahlung



(a) Abhängigkeit der Zwischenpixelkapazität von der Spannung für verschiedene Temperaturen

(b) Zwischenpixelkapazität in Abhängigkeit der Feldstärke für N-Sensoren

Abbildung 5.24: Abhängigkeit der Zwischenpixelkapazität von der Temperatur und der Feldstärke

Temperaturabhängigkeit

Wie die Abbildung 5.24a zeigt, ist die Zwischenpixelkapazität für eine Temperatur von -20 und $+22$ °C identisch.

Abhängigkeit von der Feldstärke

Abbildung 5.24b zeigt die Zwischenpixelkapazität in Abhängigkeit von der Feldstärke für n-leitende Sensoren. Für Feldstärken größer einem Volt pro Mikrometer ist die Zwischenpixelkapazität konstant. Dieses ist konsistent mit der, auf Seite 84 berechneten, Verarmungsfeldstärke.

5.8.2 Ergebnisse für bestrahlte Sensoren

Nach Bestrahlung ist die Zwischenpixelkapazität spannungsunabhängig. Wie Abbildung 5.23 zeigt, ist nach Bestrahlung die Kapazität gleich der vor der Bestrahlung für Spannungen größer der Verarmungsspannung. Die Kapazität ist auch in Durchlassrichtung gleich, wie Abbildung 5.25a zeigt. Die Verhältnisse der Zwischenpixelkapazität vor und nach Bestrahlung sind in Abbildung 5.25b gezeigt. Das Histogramm hat einen Mittelwert von $1,05 \pm 0,02$. Dieses Ergebnis ist unabhängig von dem Pixelraster, der *Bias-Struktur*, der Pixellänge, der Sensordicke, der Technologie und dem Substrat.

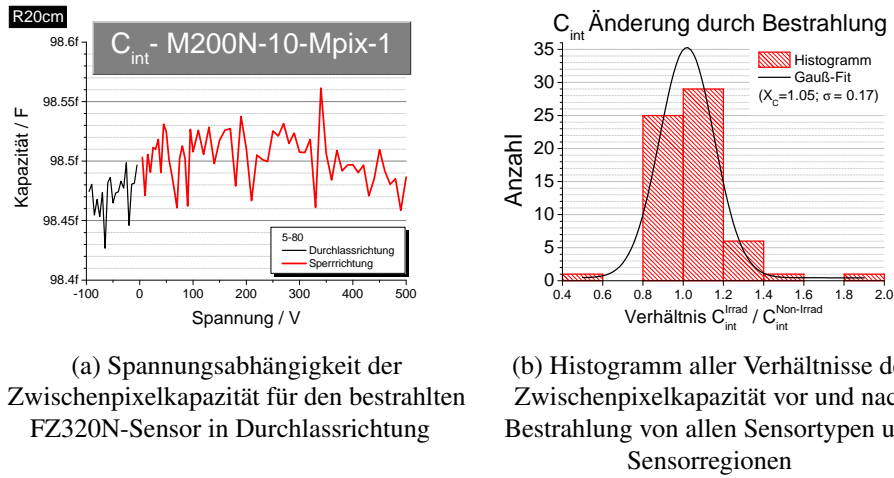


Abbildung 5.25: Änderung der Zwischenpixelkapazität durch Bestrahlung

5.8.3 Untersuchungen zum Messverfahren

Normierung

Zur Normierung der Kapazität auf die Pixellänge wurden zwei Normierungsverfahren verwendet. Die erste Normierung ist die Methode von Albergo et al. [6]. Da diese Untersuchung nur an n-leitenden Sensoren mit einer Dicke von 300 μm durchgeführt wurde [24], wurde zur Überprüfung eine reine Geometrienormierung vorgenommen, „CintGeo“, d.h.

$$C_{int}^{CintGeo} = C_{int}^{Messung} \cdot \frac{P/80\mu m}{L} \quad (5.2)$$

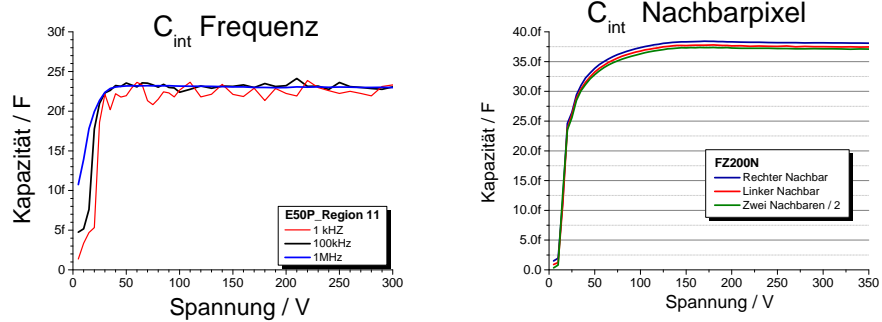
wobei P das Raster und L die Pixellänge ist. Beide Methoden liefern unabhängig von der *Bias-Struktur*, der Sensordicke und dem Raster vergleichbare Ergebnisse, wie Tabelle E.10 zeigt. Dabei sind die Werte der „CintGeo“-Methode für alle Sensortypen etwa 10% kleiner als die der „CintCMS“-Methode.

Frequenzabhängigkeit

Abbildung 5.26a zeigt die Zwischenpixelkapazität für verschiedene Messfrequenzen. Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, dass eine Frequenz von einem Kilohertz mit den vorhandenen Messgeräten die untere Messgrenze bildet. Für höhere Messfrequenzen wurde keine Frequenzabhängigkeit gemessen. Dieses ist konsistent mit Arbeiten von Barberis et al. [14].

Abhängigkeit von der Nachbaranzahl

Die Zwischenpixelkapazität ist unabhängig davon, ob nur zu einem oder zu beiden Nachbarn gleichzeitig gemessen wird, wie Abbildung 5.26b zeigt.



(a) Zwischenpixelkapazität in Abhängigkeit der Messfrequenz

(b) Dargestellt ist eine Messung zu dem linken und eine Messung zu dem rechten Nachbarn des zentralen Pixels. Im Anschluß wurde zu beiden Nachbarn gemessen und der erhaltene Wert durch zwei geteilt

Abbildung 5.26: Zwischenpixelkapazität in Abhängigkeit der Messfrequenz und der Nachbaranzahl

5.9 Messung des Polysiliziumwiderstandes

5.9.1 Ergebnisse für unbestrahlte Sensoren

Die Spannungsabhängigkeit des über den Polysiliziumwiderstand fließenden Stromes in Abhängigkeit der Messspannung ist am Beispiel des FZ320N-Sensors in Abbildung 5.27 vor und nach Bestrahlung gezeigt.

Regionsabhängigkeit

Wird der Widerstand des Polysiliziumwiderstands durch die Widerstandslänge geteilt, haben alle Regionen eines Sensortyps gleiche Werte, wie in Abbildung 5.28 anhand von Float-Zone-Silizium- und Magnetic-Czochralski-Siliziumsensoren gezeigt wird.

Durch unterschiedliche Prozessschritte³ ist der Widerstand für n-leitende Sensoren etwa 15% größer als für p-leitende Sensoren.

Temperaturabhängigkeit

Abbildung 5.29a zeigt, dass der Widerstand mit steigender Temperatur sinkt. Die Änderung des Pixelstromes mit der Temperatur ist dabei vernachlässigbar klein. Der Temperaturkoeffizient ist einige zehn Kiloohm je Kelvin und je Zentimeter Widerstandslänge, wie die Ergebnisse in Tabelle 5.5 zeigen.

³Quelle: Interne Kommunikation mit Hamamatsu

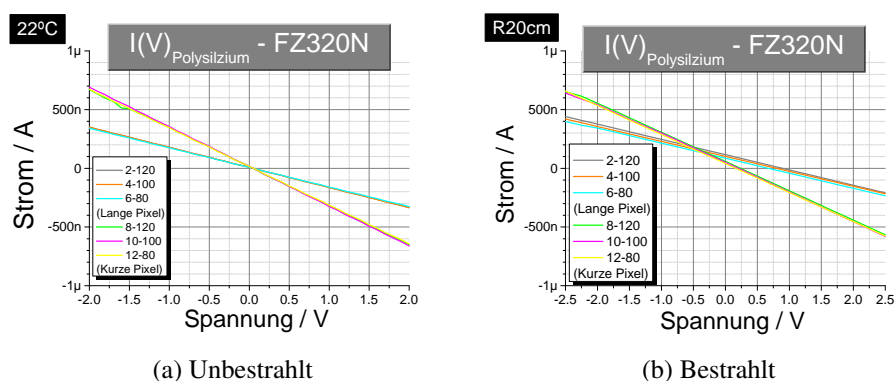


Abbildung 5.27: **Strom-Spannungs-Kennlinien des Polysiliziumwiderstandes** des FZ320N-Sensors vor und nach Bestrahlung.

KAPITEL 5. MESSERGEBNISSE FÜR MPIX-SENSOREN

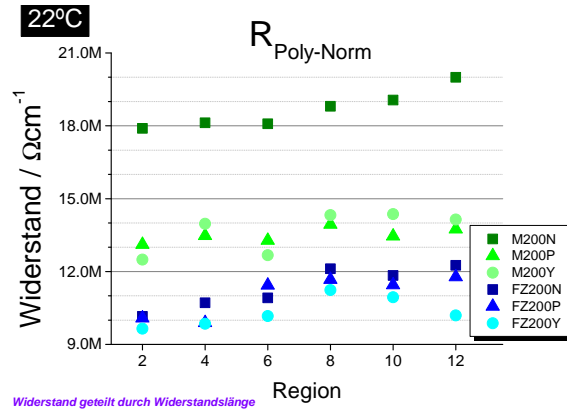


Abbildung 5.28: Durch die Widerstandsänge geteilter Polysiliziumwiderstand bei einer Temperatur von 22 °C für Sensoren aus Float-Zone-Silizium und Magnetic-Czochralski-Silizium

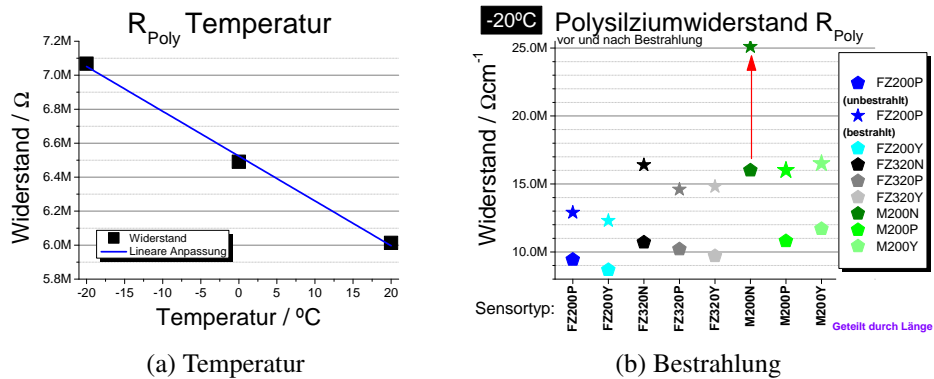


Abbildung 5.29: (a) Der Polysiliziumwiderstand in Abhängigkeit der Temperatur
(b) Der Polysiliziumwiderstand für bestrahlte und unbestrahlte Sensoren

	FZ200Y	FZ320N	FZ320Y
$R_{22^\circ C}$ [$M\Omega cm^{-1}$]	9.89	13.2	11.6
$R_{-20^\circ C}$ [$M\Omega cm^{-1}$]	11.1	14.7	13.7
Delta [$M\Omega cm^{-1}$]	-1.18	-1.52	-2.09
α_T [$k\Omega cm^{-1} K^{-1}$]	-28077	-36295	-49860

Tabelle 5.5: Normierte Widerstände $R_{Poly-Norm}$ bei 22 und $-20^\circ C$ für verschiedene Sensortypen. „Delta“ ist die Differenz beider Werte und α_T der berechnete Temperaturkoeffizient des Polysiliziumwiderstandes

	Unbestrahlt R [$M\Omega cm^{-1}$]	Bestrahlt R [$M\Omega cm^{-1}$]	Verhältnis
FZ200P	9.44	12.92	<i>1.37</i>
FZ200Y	8.68	12.34	<i>1.42</i>
FZ320N	10.68	16.36	<i>1.53</i>
FZ320P	10.24	14.59	<i>1.42</i>
FZ320Y	9.70	14.79	<i>1.52</i>
M200N	16.05	25.11	<i>1.56</i>
M200P	10.80	16.02	<i>1.48</i>
M200Y	11.67	16.46	<i>1.41</i>
Mittelwert			1.46 ± 0.01

Tabelle 5.6: Änderung des Polysiliziumwiderstandes durch Bestrahlung. Die Ergebnisse vor Bestrahlung sind auf eine Temperatur von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ normiert⁴. Das Verhältnis ist der Quotient der Werte nach und vor Bestrahlung.

5.9.2 Ergebnisse für bestrahlte Sensoren

Tabelle 5.6 zeigt, dass der Widerstand des Polysiliziums durch Bestrahlung ansteigt. Der Anstieg ist für n-leitende Sensoren im Mittel 55% und für p-leitende Sensoren 43 bzw. 45%. Eine Abhängigkeit von der Sensordicke oder dem Raster wurde, wie erwartet, nicht gemessen.

5.9.3 Einfluss der Messmethode

Durch den in Abbildung 4.7 gezeigten Messaufbau, ist der gemessene Strom die Summe des, durch die Spannung V_{Bias} verursachten, Pixelstromes und den, durch die Messspannung verursachten, Strom durch den Polysiliziumwiderstand. Daher haben, aufgrund des wesentlich höheren Pixelstromes, die gemessenen Widerstände nach der Bestrahlung eine Abhängigkeit von der Spannung V_{Bias} , wie Abbildung 5.30a zeigt.

Die Messspannung verändert die Spannung V_{Bias} um $-2,5$ bis $+2,5$ V. Die Änderung des Pixelstromes ΔI im gleichen Spannungsintervall, $\Delta V = 5$ V, ist in Abbildung 5.30b veranschaulicht. Zur Korrektur wurde diese Stromänderung von der Gesamtstromänderung der Messung des Polysiliziumwiderstandes abgezogen und der Widerstand neu berechnet.

Für die gewählte Spannung V_{Bias} ist der Effekt aber vernachlässigbar und weniger als ein Prozent nach Bestrahlung, wie Abbildung 5.31 zeigt, bzw. weniger als ein Promille vor Bestrahlung.

⁴Die verwendeten Temperaturkoeffizienten wurden zum Teil gemessen, Tabelle 5.5, und für die anderen Sensortypen die internen Ergebnisse von Wolfgang Trebersprung (Hephy) übernommen

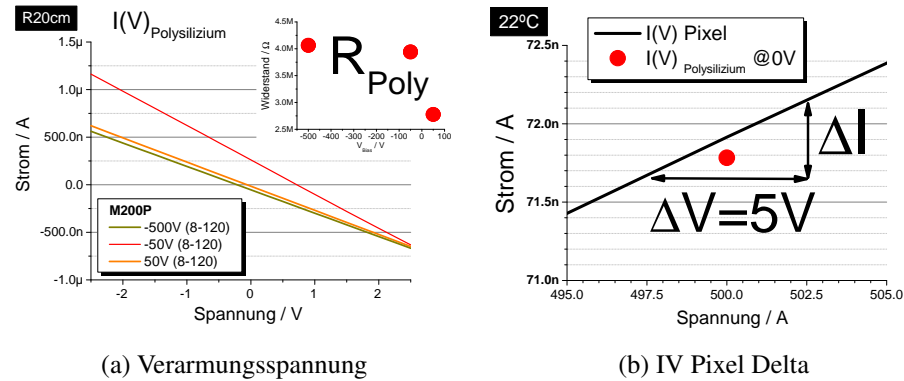


Abbildung 5.30: (a) Abhängigkeit des gemessenen Polysiliziumwiderstandes von der Spannung V_{Bias} . Gezeigt sind die Messkurven und die daraus berechneten Widerstände. (b) Änderung des Pixelstromes im Spannungsbereich V_{Bias} der Messung des Polysiliziumwiderstand. Es ist die Änderung des Stromes ΔI im Spannungsbereich $\Delta V = 5 \text{ V}$ um die Spannung V_{Bias} durch Pfeile gekennzeichnet und der Messwert der Widerstandsmessung bei Null Volt eingetragen.

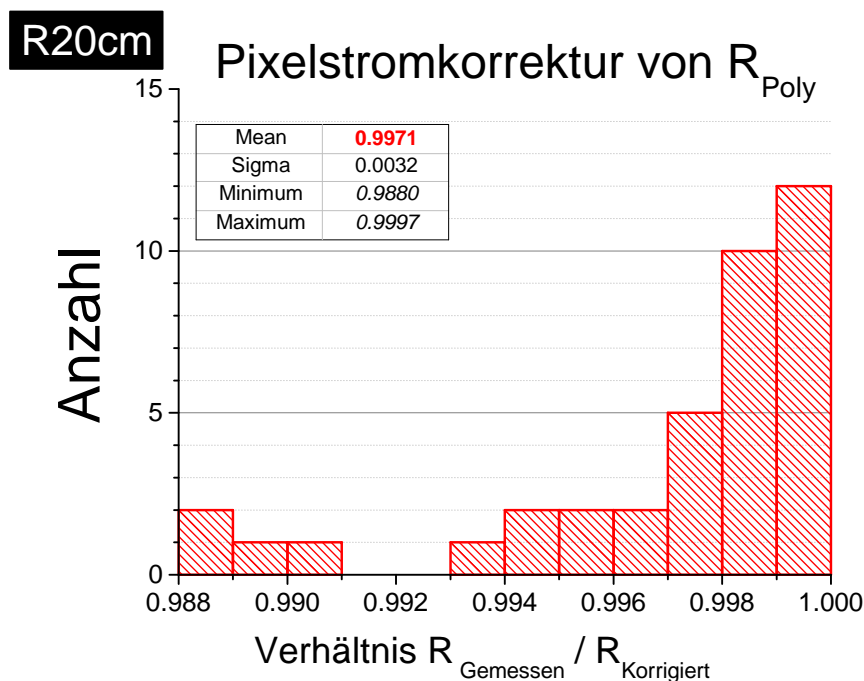


Abbildung 5.31: Verhältnisse der ermittelten Polysiliziumwiderstände vor und nach dem Abzug der Pixelstromänderung

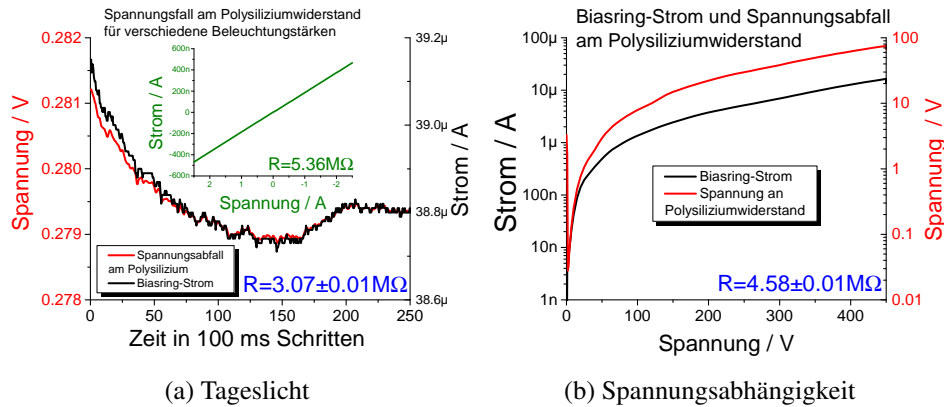


Abbildung 5.32: (a) Zeitliche Änderung des durch Beleuchtung verursachten Spannungsabfalls am Polysiliziumwiderstand (rot) und den gleichzeitig über den *Biasring* fließenden Strom (schwarz) und der daraus berechnete Widerstand. Zusätzlich ist das Ergebnis der Standardmessung dargestellt (grün) (b) Zeigt die am Polysiliziumwiderstand abfallende Spannung und den über den Biasring fließenden Strom in Abhängigkeit von V_{Bias}

Vergleichende Messmethoden

Wie auf Seite 95 gezeigt, ist der gemessene Strom die Summe der über die *Bias-Struktur* fließenden Pixelströme. Der über die *Bias-Struktur* fließende Strom ist demnach

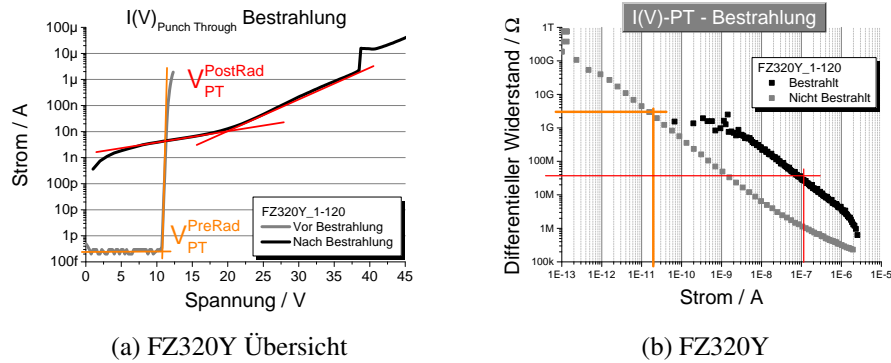
$$I_{Bias-Struktur} = I_{Bias} / \text{Pixelanzahl} \quad (5.3)$$

Mit dem, in Abbildung 4.9 gezeigten, Messaufbau wurde der Spannungsabfall am Polysiliziumwiderstand für verschiedene Beleuchtungsstärken ohne eine externe Spannung V_{Bias} gemessen. Abbildung 5.32a zeigt den Spannungsabfall am Polysiliziumwiderstand und den gleichzeitig gemessenen *Biasring*-Strom. Aus beiden Größen lässt sich der Widerstand von $3,07 \pm 0,01 \text{ M}\Omega$ bestimmen. Das Ergebnis der Standardmessung ist $5,4 \text{ M}\Omega$. Fehlerquellen der Lichtmessung sind die nicht vollständige Verarmung des Sensors und die Flutung des Sensors mit Ladungsträgern durch die Lichtquelle.

Abbildung 5.32b zeigt den über den *Biasring* fließenden Strom und die am Polysiliziumwiderstand abfallende Spannung. Aus beiden Messungen ergibt sich unabhängig von V_{Bias} ein Widerstand von $4,58 \pm 0,01 \text{ M}\Omega$.

Alle Messverfahren liefern vergleichbare Werte. Aufgrund der einfachen Handhabung, und zur Wahrung der Vergleichbarkeit zu anderen Instituten, wurden standardmäßig alle Messungen mit der in Kapitel 4.2.7 beschriebenen Methode durchgeführt.

5.10 Messung der *Punch-Through-Struktur*



(a) FZ320Y Übersicht

(b) FZ320Y

Abbildung 5.33: (a) Der in die *Punch-Through-Struktur* eingeprägte Strom als Funktion der Prägespannung vor und nach Bestrahlung für den FZ320Y-Sensor. (b) Der aus „a“ berechnete differentielle Widerstand. Eingetragen sind zusätzlich die Arbeitspunkte

5.10.1 Ergebnisse für unbestrahlte Sensoren

Abbildung 5.33 zeigt den, in die *Punch-Through-Struktur* eingepprägten, Strom in Abhängigkeit von der Prägespannung vor und nach Bestrahlung anhand des FZ320Y-Sensors.

Für Spannungen kleiner der *Punch-Through*-Spannung V_{PT} ist der Strom gleich dem Pixelstrom, wie Abbildung 5.36a zeigt. Für höhere Spannungen steigt der Strom exponentiell mit der Spannung an.⁵

Der *Punch-Through*-Effekt findet für beide Spannungsvorzeichen statt, wie Abbildung 5.36b zeigt. Die Spannung, die das gleiche Vorzeichen wie V_{Bias} hat, wird als „**positiv**“ bezeichnet, das entgegengesetzte Spannungsvorzeichen als „**negativ**“. Das positive Spannungsvorzeichen bewirkt also eine lokale Minimierung der Spannung V_{Bias} am Pixel. V_{PT} ist in negativer Richtung $2,6 \pm 0,2$ -fach so groß wie in positiver Richtung.

Tabelle 5.7 zeigt, dass die *Punch-Through*-Spannung mit dem Pixelraster abnimmt und für Regionen mit langen Pixeln etwa $0,5\text{ V}$ kleiner ist, als für Regionen mit kurzen Pixeln. Die Abnahme mit dem Raster ist $0,7\text{ V}$ pro $20\text{ }\mu\text{m}$ Rasterabnahme. Für eine Spannung V_{Bias} von 500 V ist die *Punch-Through*-Spannung $12,8\text{ V}$ für den FZ120Y-Sensor, $10,9\text{ V}$ für den FZ200Y-Sensor und $9,2\text{ V}$ für den FZ320Y-Sensor. Alle Beobachtungen zeigen, dass der *Punch-Through*-Effekt mit steigender Feldstärke zu höheren Spannungen verschoben wird.

⁵Wie in Kapitel 5.7.1 gezeigt, handelt es sich nicht um ein Nachlassen der Zwischenpixelisolation

KAPITEL 5. MESSERGEBNISSE FÜR MPIX-SENSOREN

	V_{PT}	I_{VPT} [pA]	R_{VPT} [GΩ]	V_{WP}	R_{WP} [GΩ]
FZ320Y_1_120	9.5	0.50	71.1	10.0	2.00
FZ320Y_3-100	9.0	0.40	62.2	9.8	1.76
FZ320Y_5-80	8.5	0.40	1.3	9.3	0.11
FZ320Y_7-120	10.5	0.10	>100	11.2	0.20
FZ320Y_9-100	9.5	0.20	>100	10.2	2.25
FZ320Y_11-80	8.5	0.15	4.62	9.5	0.84

Tabelle 5.7: Aufgelistet sind für die positive Spannungsrichtung die *Punch-Through*-Spannung, der Strom und der differentielle Widerstand bei V_{PT} . Zusätzlich ist die Spannung des Arbeitspunktes und der differentielle Widerstand bei einer Spannung V_{Bias} von 500 V aufgeführt.

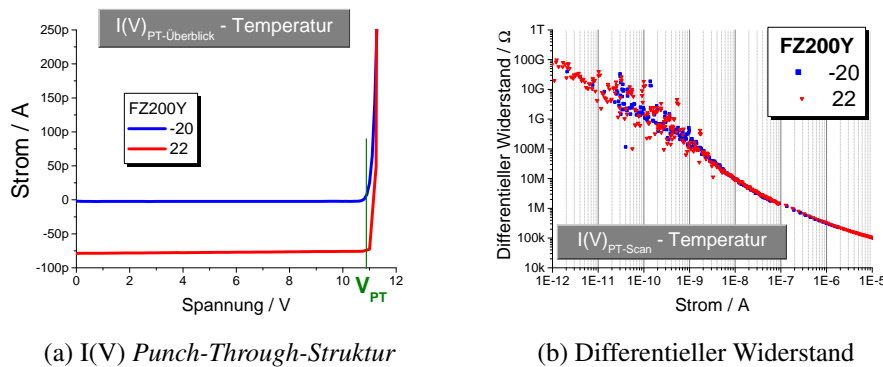


Abbildung 5.34: (a) Abhängigkeit des Stromes der *Punch-Through*-Struktur von der Messspannung für eine Temperatur von $+22$ und -20°C anhand des FZ320Y-Sensors (b) Der aus „a“ berechnete differentielle Widerstand

Der durch den Pixelstrom festgelegte Arbeitspunkt der *Punch-Through*-Struktur ist $0,5\text{ V}$ größer als die *Punch-Through*-Spannung. Der differentielle Widerstand am Arbeitspunkt beträgt mehrere zehn Gigaohm.

Temperaturabhängigkeit

Der Strom als Funktion der Spannung ist für eine Temperatur von -20 und $+22^\circ\text{C}$ in Abbildung 5.34a zeigt. Der durch den Messaufbau bedingte Pixelstrom ist bei 22°C wesentlich größer, wie auch die Untersuchungen in Kapitel 5.4.1 zeigten. Bei -20°C hat die *Punch-Through*-Spannung einen Wert von $95 \pm 3\%$ der Spannung bei einer Temperatur von 22°C . Abbildung 5.34b zeigt, dass der differentielle Widerstand für beide Temperaturen gleich ist.

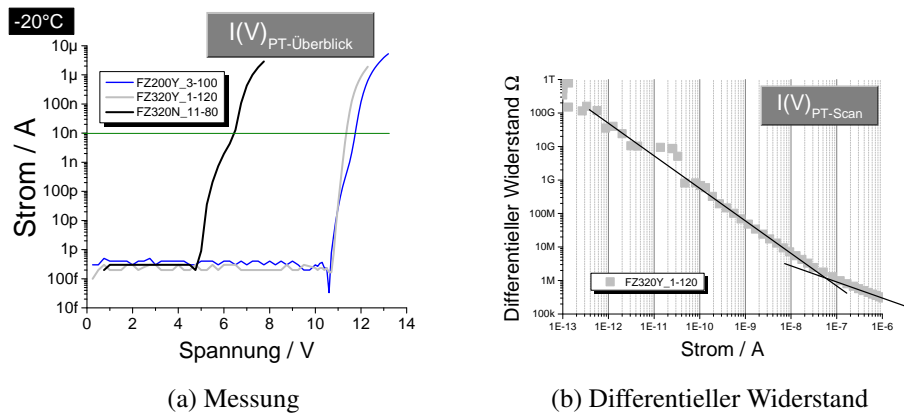


Abbildung 5.35: (a) **Dargestellt ist die Punch-Through-Überblicksmessung** für verschiedene Sensortypen
(b) Aus Messung a berechneter Differentieller Widerstand

Sättigung der *Punch-Through-Struktur*

Abbildung 5.35 zeigt für verschiedene Sensortypen die Überblicksmessungen der *Punch-Through-Struktur* in einer logarithmischen Darstellung. Für alle Sensortypen beginnt der Strom ab einem Wert von 10 nA zu sättigen. Das Pixel kann also über die *Punch-Through-Struktur* nicht beliebig viel Ladung in kurzer Zeit an den *Biasring* abgeben. Dieses wird für einen Bipolartransistor vorhergesagt.

Die Sättigung kann auch anhand des differentiellen Widerstandes in Abbildung 5.35b untersucht werden. Bis etwa 10 nA nimmt der differentiellen Widerstandens in Abhängigkeit des eingprägten Strom einem konstanten exponentiellen Abfall ab. Für Ströme größer 10 nA wird die Abnahme geringer.

5.10.2 Ergebnisse für bestrahlte Sensoren

Nach Bestrahlung ist die Kennlinie der *Punch-Through-Struktur*, aufgrund des höheren Pixelstromes, zu größeren Strömen verschoben, wie sich Abbildung 5.33a entnehmen lässt.

Für p-leitende Sensoren ist in positiver Richtung die *Punch-Through-Spannung* einen Faktor $2,4 \pm 0,1$ größer als vor Bestrahlung. Dieses führt zu einer effektiven Senkung der Spannung V_{Bias} , wie z.B. aus den Pixelstrommessungen nach Bestrahlung in Abbildung E.3 ersichtlich wird. Die vor Bestrahlung vorhandene Abhängigkeit von der Pixelgeometrie wurde nach Bestrahlung nicht gemessen. Für eine Prägespannung V_{Jump} , die etwa 20 V größer als die *Punch-Through-Spannung* ist, kommt es zu einem starken Stromanstieg. Der Stromanstieg ist etwa zwei Größenordnungen und geschieht in einem Spannungsbereich kleiner 100 mV. Ein Einfluß der Zwischenpixelisolation kann dabei ausgeschlossen werden.

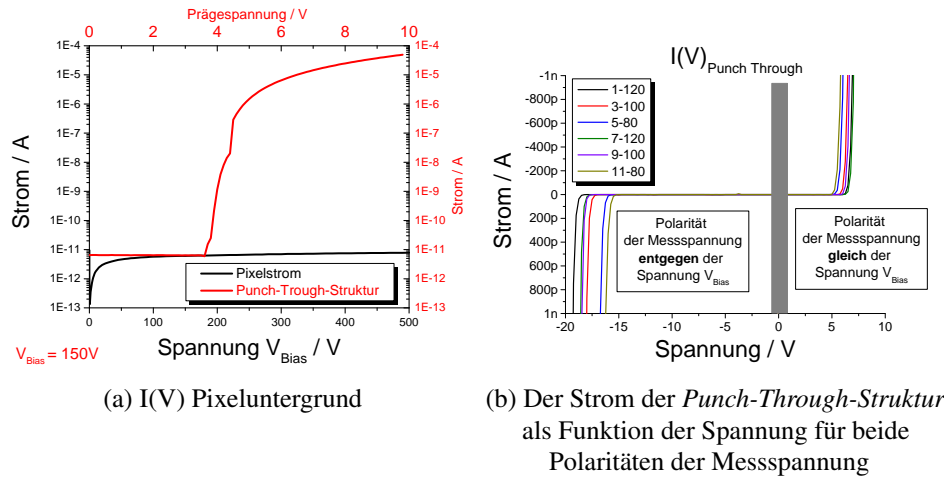


Abbildung 5.36: (a) Die Abhängigkeit des eingesprägten Stromes von der Prägespannung für beide Spannungspolaritäten anhand des unbestrahlten FZ320N Sensors. (b) Dargestellt ist die $I(V)$ Pixelmessung (schwarz) und die $I(V)$ *Punch-Through-Struktur*-Messung (rot)

Für Spannungen V_{Jump} größer ist der Strom zunächst nahezu konstant. Für Spannungen größer ein Volt als V_{Jump} , steigt der Strom wieder mit demselben Exponentialgesetz wie vorher.

V_{Jump} ist nicht von der Pixelgeometrie abhängig. Bei 320 μm dicken Float-Zone-Siliziumsensoren ist V_{Jump} $39,8 \pm 0,2$ V und bei 200 μm dicken Float-Zone-Silizium- und Magnetic-Czochralski-Siliziumsensoren $35,6 \pm 0,9$ V. Der Strom vor dem Anstieg, I_{Jump} , ist für alle Sensoren $18,8 \pm 1,8$ nA. Für große Ströme wurde nach Bestrahlung kein Sättigungsverhalten gemessen.

Der Arbeitspunkt ist nach Bestrahlung 2 V größer als die *Punch-Through*-Spannung. Der differentielle Widerstand am Arbeitspunkt beträgt mehrere hundert Megaom und ist somit, durch den größeren Pixelstromuntergrund, zwei Größenordnungen kleiner als vor Bestrahlung.

In negativer Richtung wurde für Prägespannungen kleiner 50 V kein *Punch-Through*-Effekt gemessen.

Bei n-leitenden Sensoren wurde für Spannungen kleiner der Standard-Testspannung von 50 V kein *Punch-Through*-Effekt gemessen. Aufgrund der Gefahr von Probenzerstörung, wurde nur für eine kleine Stichprobe eine höhere Spannung getestet. Der *Punch-Through*-Effekt tritt erst bei Spannungen größer 55 V auf, wie Abbildung 5.37a zeigt. Die *Punch-Through*-Spannung ist in beide Richtungen mit einer Übereinstimmung von Zehn Volt gleich und unabhängig von der Region.

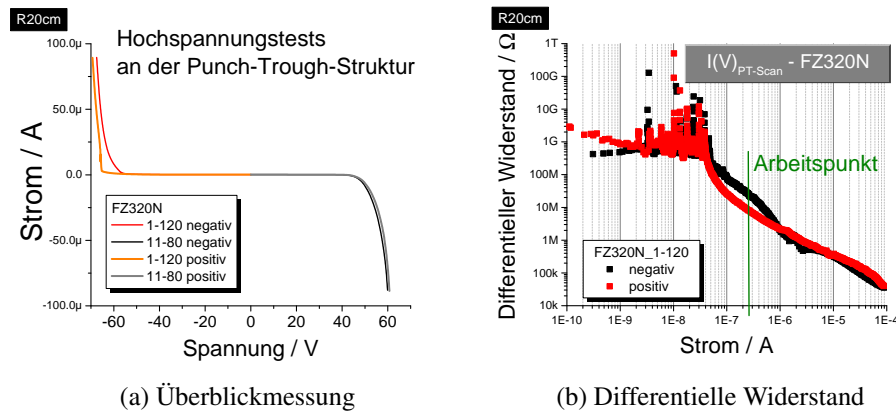


Abbildung 5.37: Für den n-leitenden Sensor ist nach Bestrahlung die Überblicksmessung und der aus dieser berechnete differentielle Widerstand dargestellt

Abbildung 5.37b zeigt den differentiellen Widerstand der *Punch-Through-Struktur* und den aus dem Pixelstrom resultierenden Arbeitspunkt. Der differentielle Widerstand ist für beide Spannungsrichtungen gleich und der Arbeitspunkt liegt im dynamischen Bereich der *Punch-Through-Struktur*. Für Ströme kleiner einige Zehn Nanoampere ist der differentielle Widerstand nicht abhängig vom eingepprägten Strom. Diese Degeneration ist auch in früheren Untersuchungen gemessen worden. [10, 13, 97].

Abhängigkeit von der Betriebsspannung

Abbildung 5.38 zeigt Messungen der *Punch-Through-Spannung* für verschiedene Spannung V_{Bias} . Die *Punch-Through-Spannung* wird mit steigender Spannung V_{Bias} größer, wie Abbildung 5.38a zeigt. Auch wird V_{Jump} nach Bestrahlung mit steigender Spannung V_{Bias} höher, wie Abbildung 5.38b zeigt. Der „Stromsprung“ tritt erst auf, wenn V_{Bias} größer als die Spannung V_{PT} ist.

Das, auf Seite 114 diskutierte, Sättigungsverhalten des Stromes findet erst für Spannungen größer 10 V statt, wie Abbildung 5.38c zeigt. Für kleinere Spannungen ist die Änderung des differentiellen Widerstandes über den gesamten Strombereich gleich.

Die Abhängigkeit der *Punch-Through-Spannung* von V_{Bias} ist für verschiedene Sensortypen vor und nach Bestrahlung in Abbildung 5.38d gezeigt. Die Abhängigkeit ist sensortypunabhängig und für bestrahlte Sensoren zu höheren *Punch-Through-Spannungen* verschoben. Vor und nach Bestrahlung nimmt die *Punch-Through-Spannung* zunächst für kleine Spannungen zu und wird für Spannungen größer 100 V konstant.

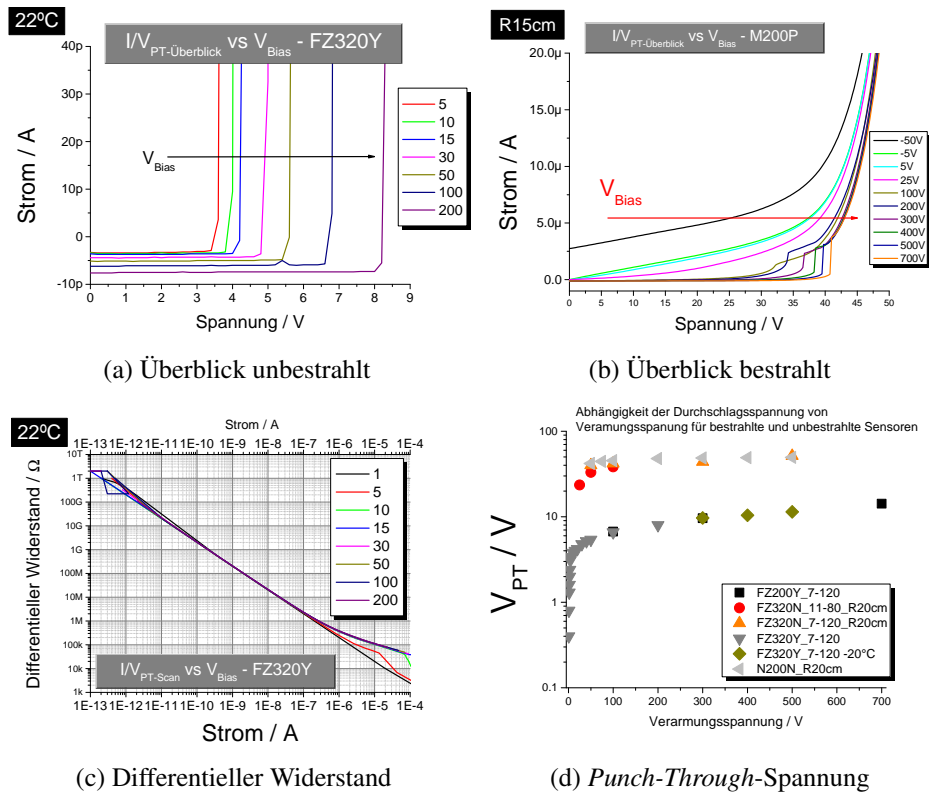


Abbildung 5.38: (a) und (b) zeigen die Überblicksmessungen von p-leitenden Sensoren vor und nach Bestrahlung (c) Der aus „a“ berechnete differentielle Widerstand. (d) Die aus den Messungen bestimmte *Punch-Through*-Spannung für bestrahlte und unbestrahlte Sensoren

5.10.3 Einfluss der Messmethode

Abbildung 5.39a zeigt den ohne Spannung V_{Bias} über den *Biasring* fließenden Strom und die über die *Punch-Through-Struktur* abfallende Spannung für unterschiedliche Lichtintensitäten. Wie Abbildung 5.39b zeigt, ist der Spannungsabfall für verschiedene Lichtintensitäten im Bereich von 0,1 bis 0,5 V und somit unter der für pn-Übergänge üblichen Diffusionsspannung von 0,6 bis 0,7 V [143]. Mit Formel 5.3 wurde der, über die *Punch-Through-Struktur* fließende, Strom und mit diesem der Widerstand der *Punch-Through-Struktur* berechnet. Die so erzielten Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit den Resultaten der Standardmessungen, wie in Abbildung 5.39d gezeigt ist.

Mit dem Messaufbau in Abbildung 4.9 wurde die, über die *Punch-Through-Struktur* abfallende, Spannung und der über den *Biasring* fließende Strom in Abhängigkeit von V_{Bias} gemessen und die Ergebnisse in Abbildung 5.40a dargestellt. Die Abbildung 5.40b zeigt, den aus diesen Messungen berechneten differentiellen Widerstand und den Vergleich mit der Standardmessung. Die Ergebnisse stimmen mit einer Abweichung von einem Faktor fünf überein. Ein Vergleich mit den Ergebnissen in Abbildung 5.33 macht deutlich, dass durch die gute Stromauflösung der Picoamperemeter mit der Standardmessung ein weit größerer Bereich untersucht werden kann. Abbildung 5.40c zeigt den aus Standardmessungen bestimmten differentiellen Widerstand unter dunklen Bedingungen und bei Tageslicht. Durch den Lichteinfall werden zusätzliche Ladungsträger generiert, die zu einer Erhöhung des Pixelstromuntergrundes führen. Die *Punch-Through*-Spannung wird dadurch nicht beeinflusst. Durch die zusätzlichen Ladungsträger wird der dynamische Bereich der *Punch-Through-Struktur* verschoben und die Abnahme des differentiellen Widerstandes mit dem eingepprägten Strom kleiner.

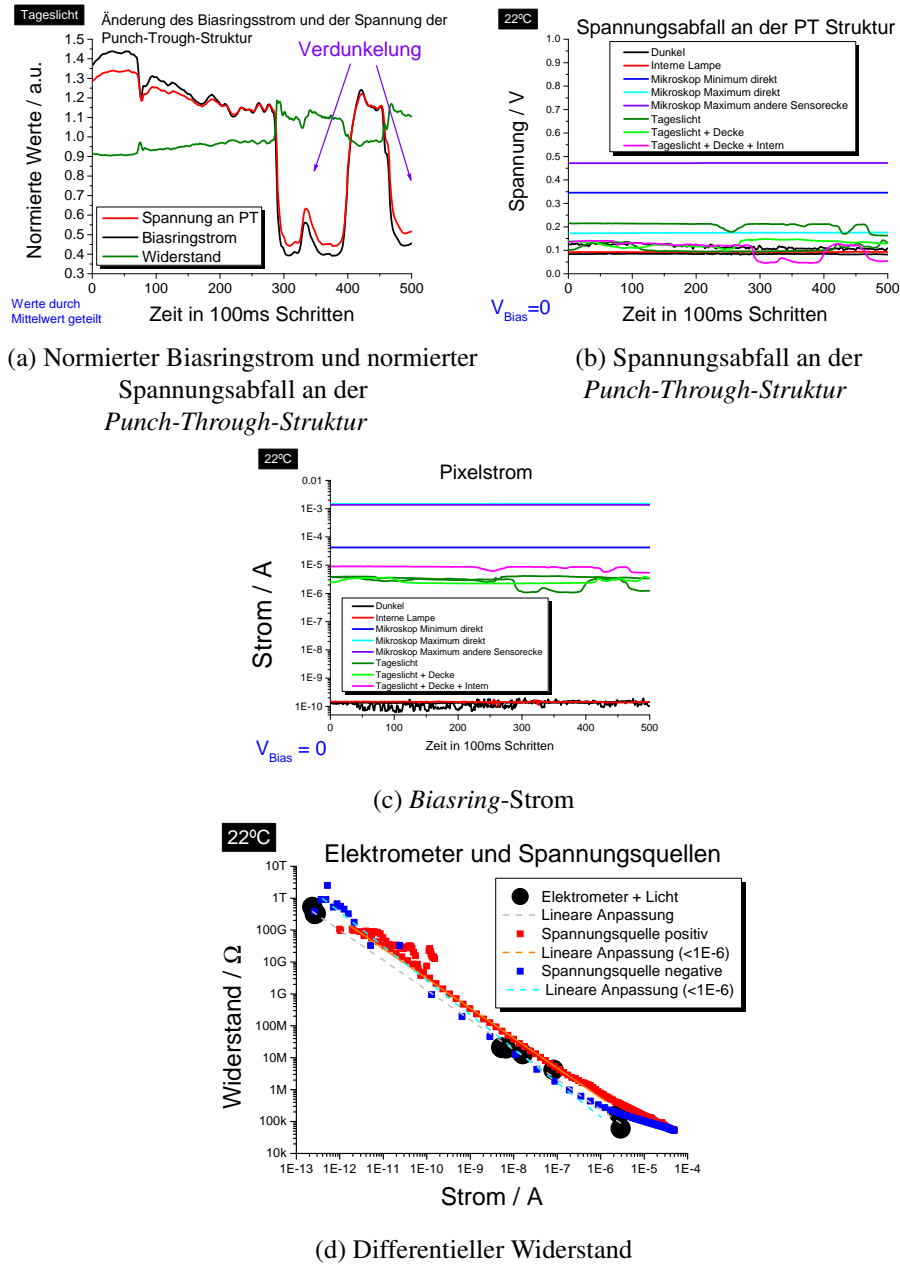
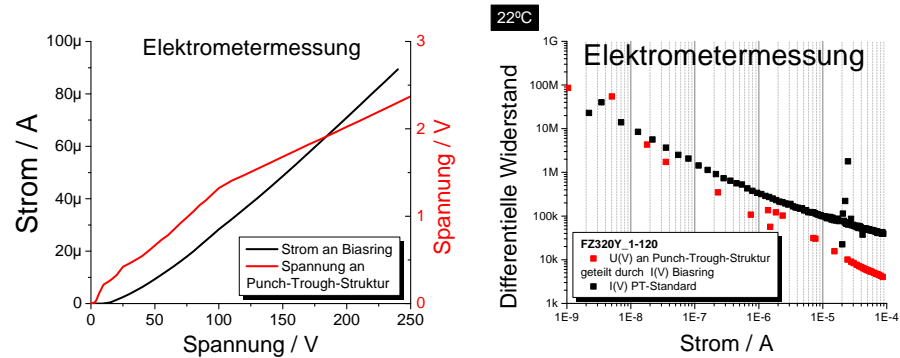
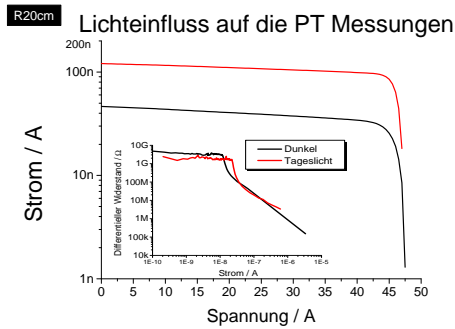


Abbildung 5.39: Gezeigt sind der Biasring-Strom und der Spannungsabfall an der Punch-Through-Struktur für Region 11-80 des unbestrahlten M200Y-Sensors ohne Spannung V_{Bias} bei Beleuchtung.



(a) Normierter Biasringstrom und normierter Spannungsabfall an der Punch-Through-Struktur (b) Differentieller Widerstand unbestrahlt



(c) M200N

Abbildung 5.40: Gezeigt sind der *Biasring*-Strom und der Spannungsabfall an der *Punch-Through-Struktur* für Region 1-120 des unbestrahlten FZ320Y-Sensors für verschiedene Spannungen V_{Bias} . (b) zeigt den aus „a“ berechneten differentiellen Widerstand und den Vergleich mit den Ergebnissen der Standardmessung. (c) Zeigt den an der *Punch-Through-Struktur* eingepprägten Strom in Abhängigkeit der Prägespannung und dem daraus berechneten differentiellen Widerstand bei abgedunkelter Umgebung und bei Tageslicht.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Es wurde die Strahlenhärte von MPix-Sensoren untersucht. Dafür wurden die elektrischen Eigenschaften der Sensoren vor und nach Bestrahlung gemessen. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf die *Bias-Strukturen* und deren Einfluß auf die elektrischen Eigenschaften des Sensors.

Zur Durchführung des komplexen Messprogrammes wurde eine Probestation in Betrieb genommen, die Steuerungssoftware entwickelt, eine Datenbank erstellt, neuartige Messmethoden eingeführt, die zugehörigen Auswertungsverfahren entwickelt und diese in eine umfangreiche Auswertungssoftware implementiert.

Die Steuerungssoftware ermöglicht einen voll automatisierten Messablauf und die vollständige Kontrolle über alle Einstellungen der Probestation und aller Messgeräte. Das Programm ist aufgrund seiner flexiblen Programmstruktur beliebig mit neuen Messgeräten und Auswertungsmethoden erweiterbar. Nach dem Abschluß einer jeden Messung werden die Daten automatisiert ausgewertet und die Ergebnisse in eine Datenbank geschrieben.

Die Datenbank wurde so entwickelt, dass sie flexibel und einfach auf neue Messmethoden angepasst und erweitert werden kann. Nach Abschluß des Messprogramms sind rund zehntausend Einzelmessungen mit zweihundertfünfzigtausend Messparametern in der Datenbank eingetragen worden. Zur Auswertung der umfangreichen Datenmenge wurde ein Programm geschrieben, dass es erlaubt, gezielt alle Parameter aus der Datenbank auszulesen und miteinander zu verknüpfen.

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

6.1.1 Dunkelströme

Vor Bestrahlung ist der Volumenstrom von Sensoren aus Float-Zone-Silizium mit $0,85\mu\text{Acm}^{-3}$ einen Faktor drei kleiner als bei Sensoren aus Magnetic-Czochralski-Silizium mit $3,46\mu\text{Acm}^{-3}$. Der Strom nimmt für Float-Zone-Siliziumsensoren mit der Sensordicke ab. Diese Ergebnisse sind unabhängig von den *Bias-Strukturen* und werden durch Ergebnisse anderer Arbeitsgruppen bestätigt [79].

Durch Bestrahlung steigt der Strom stark an. Der Anstieg ist für 320 μm dicke Float-Zone-Siliziumsensoren größer als für 200 μm dicke und kleiner für Sensoren aus Magnetic-Czochralski-Silizium verglichen mit Sensoren aus Float-Zone-Silizium. Die Änderung ist unabhängig von den *Bias-Strukturen*.

Nach Bestrahlung kann der Sensor auch in Durchlassrichtung betrieben werden. Diese Eigenschaft könnte dafür genutzt werden, um die Strahlenhärte durch einen Betrieb in Durchlassrichtung zu erhöhen [34]. Der Strom ist, bei gleichem Spannungsbetrag, in Durchlassrichtung etwa einen Faktor Zehn größer als in Sperrrichtung.

6.1.2 Kapazitäten zur Sensorrückseite

Die Pixelkapazität von Regionen mit einer *Punch-Through-Struktur* ist größer als bei Regionen mit einem Polysiliziumwiderstand. Durch die zusätzliche Kapazität der *Punch-Through-Struktur* liegt demnach mehr kapazitative Last am Auslesechip des Pixels für Regionen mit einer *Punch-Through-Struktur* an.

Die Kapazität nimmt durch die Strahlenschäden ab. Dieses ist unabhängig von den *Bias-Strukturen*.

6.1.3 Zwischenpixeleigenschaften

Der Zwischenpixelwiderstand vor Bestrahlung ist größer als 100 G Ω . Durch die Strahlenschäden sinkt die Zwischenpixelisolation um drei Größenordnungen, ist aber für den Sensorbetrieb noch ausreichend groß.

Die Zwischenpixelkapazität ist für alle Sensoren einige zehn Femtofarad. Durch Bestrahlung ändert sich die Zwischenpixelkapazität nicht.

6.1.4 Bias-Strukturen

Der Polysiliziumwiderstand ist für unbestrahlte Sensoren, abhängig vom Sensortyp, zwischen 8 bis 16 M Ω je Zentimeter Widerstandslänge. Dieser Wert steigt durch Bestrahlung um etwa 50%. Dieses ist für den Sensorbetrieb aufgrund der geminderten Rauschentstehung vorteilhaft.

Die *Punch-Through-Struktur* hat vor Bestrahlung am Arbeitspunkt einen differentiellen Widerstand von einigen hundert Gigaohm. Nach Bestrahlung sinkt der Wert auf einige hundert Megaohm, ist aber immer noch größer als der Widerstand der verwendeten Polysiliziumwiderstände. Auch die *Punch-Trough-Spannung* ist nach Bestrahlung gestiegen.

6.2 Schlußfolgerungen und Ausblick

Für alle unbestrahlten Sensoren wurde eine hervorragende Sensorqualität mit sehr gleichmäßigen Pixelparametern innerhalb einer Region gemessen. Beide *Bias-Strukturen* arbeiten entsprechend den Erwartungen. Nach Bestrahlung ist der Polysiliziumwiderstand, bei gestiegenem Widerstand, weiterhin voll funktionsfähig. Bei der *Punch-Through-Struktur* verursachen die Strahlenschäden eine Erhöhung der *Punch-Through-Spannung* und ein Absinken des differentiellen Widerstandes am Arbeitspunkt.

Ob p-leitende Sensoren mit einer *Punch-Through-Struktur* nach Bestrahlung noch ausreichend gut als Sensor funktionsfähig sind, muss durch Signalsammelungsstudien untersucht werden. Bei n-leitenden Sensoren wurden die aus der Literatur bekannten Untersuchungsergebnisse reproduziert.

Die Materialstudien zeigen eine Degeneration der relevanten Sensorparameter für alle Sensortypen durch Bestrahlung. Der Anstieg des Dunkelstromes ist für Sensoren aus Float-Zone-Silizium mit einer Dicke von 320 μm stärker als für 200 μm dicke Sensoren. Der geringere Stromanstieg durch Bestrahlung bei Magnetic-Czochralski-Silizium ist ein starkes Argument für dessen Verwendung.

Auch nach Bestrahlung sind für alle untersuchten Technologien und Pixelgeometrien die Parameter für einen Sensorbetrieb ausreichend. Beide untersuchten Isolationsmechanismen (pStop und pSpray) zwischen den Pixeln bei p-leitenden Sensoren gewähren nach Bestrahlung eine ausreichend gute Pixelisolation.

Durch die HPK-Kampagne wurde das Verständnis der Strahlenhärte von Siliziumsensoren verbessert und demonstriert das Siliziumsensoren auch weiterhin die hohen Anforderungen am LHC erfüllen können. Durch die erzielten Ergebnisse wurde die Grundlage für die weitere Entwicklung von effizienten Sensormodulen am LHC gelegt [62].

KAPITEL 6. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Abbildungsverzeichnis

1.1	LHC-Beschleunigertunnel	3
1.2	Invariantes Massenspektrum von Zwei-Myonen-Zerfällen	5
1.3	Teilchen des Standardmodells	6
1.4	Das Higgs-Potential	9
1.5	Feynman-Diagramme für die Higgs-Boson-Erzeugung	11
1.6	Zerfallskanäle des Standardmodell-Higgs-Bosons	11
1.7	Schnittbild des Barrals des CMS-Experiments	15
1.8	Teilchenspuren im CMS-Experiment	16
1.9	Aufbau des Spurdetektors	17
2.1	Bandschema des intrinsischen Halbleiters	20
2.2	Spannungsinduzierte Elektronen- und Löcherdiffusion	21
2.3	Der pn-Übergang	23
2.4	Abhängigkeit der elektrischen Eigenschaften des pn-Übergangs von der Spannung	25
2.5	Das Kristallgitter von Silizium.	27
2.6	Die Bandstruktur von Silizium	29
2.7	Veranschaulichung von Defektypen	30
2.8	TSC Messungen	32
2.9	Strahlungsinduzierte Defekte und deren energetische Lage	32
2.10	Effektive Ladungsträgerkonzentration als Funktion der Annealing-Zeit.	33
2.11	Einfluss von Kohlenstoff- und Sauerstoffanreicherung auf N_{eff}	33
2.12	Typumwandlung	35
2.13	Abhängigkeit der Ladungsträgerdichte vom Strahlenfluss	36
2.14	Änderung der CMS-Pixelsensoreigenschaften durch Bestrahlung	37
2.15	Energieverlust von Myonen in Silizium	38
2.16	Funktionsprinzip eines Sensors	39
2.17	Aufbau des Float-Zone-Verfahren	41
2.18	Herstellungsschritte von Siliziumsensoren	43
2.19	Aufbau eines Streifensensors	43
2.20	Funktionsprinzip der <i>Punch-Through-Struktur</i>	45
2.21	Isolationstechniken für p-leitende Sensoren	46

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

2.22	Wichtige Sensorkenngrößen	47
3.1	2S-Modul und der simulierte Strahlenfluss im CMS-Detektor am HL-LHC	50
3.2	Fotographie des MPix-Sensors	52
3.3	Die <i>Bias-Strukturen</i>	53
4.1	Der Messplatz	58
4.2	Prinzipieller Aufbau eines LCR-Meters und eines Amperemeters .	60
4.3	Schaltbilder der <i>Biasring</i> -Messungen	61
4.4	Berechnung der Verarmungsspannung	64
4.5	Schaltbilder der Pixelmessungen	65
4.6	Schaltbild der Zwischenpixelmessungen	67
4.7	Schaltbild der <i>Bias-Struktur</i> -Messung	68
4.8	Veranschaulichung des Algorithmus zur Bestimmung der <i>Punch- Through</i> -Spannung	69
4.9	Messung des Spannungsabfalls an der <i>Bias-Struktur</i> mittels eines Elektrometers	71
4.10	Benutzeroberfläche der Messsoftware	73
5.1	Stabilität der Messungen	76
5.2	I(V)-Kennlinie des <i>Biasrings</i>	78
5.3	I(V)- <i>Biasring</i> Dickenabhängigkeit	78
5.4	Temperaturabhängigkeit und Durchbruchspannung des <i>Biasrings</i> .	79
5.5	Stromanstieg des <i>Biasrings</i> als Funktion der Spannung vor bzw. nach Bestrahlung	81
5.6	Zunahme des Stromes des <i>Biasrings</i> durch die Bestrahlung	82
5.7	Strom des <i>Biasrings</i> in Durchlass- und Sperrrichtung.	82
5.8	Abhängigkeit der Kapazität des <i>Biasrings</i> von der Spannung . . .	83
5.9	Ermittelte Verarmungsspannung	84
5.10	Frequenz	85
5.11	Einfluß der Temperatur und des Strahlungsflusses auf die <i>Biasring</i> - Kapazität	86
5.12	Spannungsabhängigkeit des Pixelstromes	87
5.13	Durchbruchsstrom und Stromanstieg durch Bestrahlung	88
5.14	Der Pixelstrom bei Durchlassspannung	90
5.15	Anzahl- und Nachbartest	91
5.16	Pixelkapazität in Abhängigkeit der Spannung	92
5.17	Änderung der Pixelkapazität durch Bestrahlung	93
5.18	Einfluss der Pixelanzahl	94
5.19	Zwischenpixelwiderstandsmessung vor und nach Bestrahlung . . .	100
5.20	Abhängigkeit des Zwischenpixelwiderstandes von der Temperatur und hohe Spannungen	100
5.21	Abhängigkeit des Zwischenpixelwiderstandes von der Spannung .	101

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

5.22	Abhängigkeit des Zwischenpixelwiderstandes von der Spannung	102
5.23	Zwischenpixelkapazitätsmessung vor und nach Bestrahlung	103
5.24	Abhängigkeit der Zwischenpixelkapazität von der Temperatur und der Feldstärke	104
5.25	Änderung der Zwischenpixelkapazität durch Bestrahlung	105
5.26	Zwischenpixelkapazität in Abhängigkeit der Messfrequenz und der Nachbaranzahl	106
5.27	Kennlinie vom Polysiliziumwiderstand	107
5.28	Durch die Widerstandslänge geteilter Polysiliziumwiderstand	108
5.29	Polysiliziumwiderstandsänderung durch Temperatur und durch Be- strahlung	108
5.30	Einfluß des Pixelstromes auf den Polysiliziumwiderstand	110
5.31	Normierung des Polysiliziumwiderstandes	110
5.32	Elektrometermessungen am Polysiliziumwiderstand	111
5.33	Kennlinie <i>Punch-Through-Struktur</i> durch Bestrahlung	112
5.34	Temperaturabhängigkeit des Stromes der <i>Punch-Through-Struktur</i>	113
5.35	Überblicksmessung der <i>Punch-Through-Struktur</i>	114
5.36	Untersuchungen zur Messmethode bei der <i>Punch-Through-Struktur</i>	115
5.37	<i>Punch-Through-Struktur</i> nach Bestrahlung für n-leitende Sensoren	116
5.38	Abhängigkeit der <i>Punch-Through-Spannung</i> von der Spannung	117
5.39	Untersuchungen zur Methode bei der <i>Punch-Through-Struktur</i> mit Licht und ohne Biasspannung	119
5.40	Untersuchungen zur Methodik bei der <i>Punch-Through-Struktur</i> mit Biasspannung	120
A.1	General setting screen	148
A.2	Interface of the SubVI „XY table“	152
A.3	Measurement screen	156
A.4	Expert screen	158
A.5	Screen of the change device list SubVI	160
B.1	User interface of the DataAnalyzer Software	174
C.1	User interface of the DataReader Software	185
D.1	Web interface of the CecDB database	193
E.1	Abhängigkeit des Stromes von der Spannung V_{Bias} für einen der unbestrahlten FZ120N-Sensoren	204
E.2	Strom des <i>Biasrings</i> bei konstanter Spannung	204
E.3	I(V) Pixel FZ320Y	205

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Tabellenverzeichnis

1.1	Die CMS-Unterdetektoren	14
2.1	Eigenschaften von Silizium	27
2.2	Defekte in Silizium	28
2.3	Energieniveaus von Fremdatomen in Silizium	30
2.4	Sauerstoff- und Kohlenstoffkonzentration in Silizium	40
3.1	Anzahl der untersuchten MPix-Sensoren	50
3.2	Teststrukturen der HPK-Kampagne	51
3.3	Sensoranforderungen der HPK-Kampagne	52
3.4	Pixelgeometrien der MPix-Regionen	54
3.5	Namensschlüsseldefinition für die HPK-Kampagne	55
4.1	Verwendete Messgeräte und Spannungsquellen	59
4.2	Spannungseinstellungen der Messungen	62
4.3	Vergleich der ermittelten Verarmungsspannung	66
5.1	Abhängigkeit des <i>Biasring</i> -Stromes von der Temperatur	79
5.2	Vergleich des Durchlass- und Sperrstromes	81
5.3	Bias-Struktureinfluss auf das Rauschen	96
5.4	Volumenstrom der Pixel und des <i>Biasrings</i> (BR) vor und nach Bestrahlung. Dargestellt ist der Quotient der Mittelwerte der Ströme der entsprechenden Sensorgruppen	97
5.5	Normierte Widerstände $R_{Poly-Norm}$ bei 22 und $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ für verschie- dene Sensortypen. „Delta“ ist die Differenz beider Werte und α_T der berechnete Temperaturkoeffizient des Polysiliziumwiderstandes	108
5.6	Änderung des Polysiliziumwiderstandes mit Bestrahlung	109
5.7	Parameter der <i>Punch-Through-Struktur</i> -Messung	113
A.1	List of error codes	162
D.1	Tables of the CecDB	199
E.1	Aus den $I(V)$ - <i>Biasring</i> bestimmte Durchbruchsspannungen	202
E.2	Anteil der abrupten Druchbrüche	202

TABELLENVERZEICHNIS

E.3	Anstieg des <i>Biasring</i> -Stromes durch Bestrahlung	203
E.4	Aus den I(V) Pixelmessungen bestimmte Durchbruchsspannungen	206
E.5	Anstieg des Pixeldunkelstromes durch Bestrahlung	207
E.6	Verhältnis des <i>Biasring</i> - und des Pixelstromes	208
E.7	Verarmungsspannungen für die verschiedenen Sensortypen	208
E.8	Änderung der Pixelkapazität durch Bestrahlung. Abgebildet sind die Verhältnisse der Kapazitäten bei einem Verarmungsfeld von $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ nach und vor Bestrahlung für den <i>Biasring</i> (BR) und die Pixel. Die Spalte „Verhältnis“ gibt den Quotienten beider Verhältnisse an.	209
E.9	Änderung des Zwischenpixelwiderstandes durch Bestrahlung . . .	209
E.10	Vergleich der Normierungsmethoden CintCMS und CintGeo. Dargestellt ist das Verhältnis der beiden Normierungsergebnisse .	210

Literaturverzeichnis

- [1] A. Affolder et al. Silicon detectors for the slhc. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 658:11–16, 2011. doi: 10.1016/j.nima.2011.04.045.
- [2] Agilent E4981A 120 Hz/1 kHz/1 MHz Capacitance Meter - User Manual. Agilent Technologies Deutschland GmbH, 2008-12-01 edition, 2008.
- [3] Agilent 4263B LCR Meter - Operation Manual. Agilent Technologies Japan Ltd., 04263-90050 edition, 2003.
- [4] Agilent 4284A Precision LCR Meter - Manual. Agilent Technologies Japan Ltd., 04284-90041 edition, 2004.
- [5] Steven P. Ahlen. Theoretical and experimental aspects of the energy loss of relativistic heavily ionizing particles. Rev. Mod. Phys., 52:121–173, 1980. doi: 10.1103/RevModPhys.52.121.
- [6] S. Albergo et al. Optimization of the silicon sensors for the cms tracker. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 466(2): 300–307, 2001. doi: 10.1016/S0168-9002(01)00544-7.
- [7] Oracle and/or its affiliates. MySQL-Referenzhandbuch v579. Oracle, 2011-12-20.
- [8] L. Andricek et al. Single-sided p+n and double-sided silicon strip detectors exposed to fluences up to 2 times 10¹⁴/cm² 24gev protons. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 409(1-3):184–193, 1998. doi: 10.1016/S0168-9002(97)01259-X.
- [9] T. Angelescu and A. Vasilescu. Comparative radiation hardness results obtained from various neutron sources and the niel problem. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 374(1):85–90, 1996. doi: 10.1016/0168-9002(96)00087-3.
- [10] F. Arfelli et al. Design and evaluation of ac-coupled, foxfet-biased, edge-on silicon strip detectors for x-ray imaging. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 385(2):311 – 320, 1997. doi: 10.1016/S0168-9002(96)01076-5.

LITERATURVERZEICHNIS

- [11] C.L. Axness et al. Radiation characteristics of sipos and polysilicon resistors. IEEE Transactions on Nuclear Science, 38(6):1365–1369, 1991. doi: 10.1109/23.124118.
- [12] G. Baccarani, B. Ricco, and G. Spadini. Transport properties of polycrystalline silicon films. Journal of Applied Physics, 49(11):5565–5570, 1978. doi: 10.1063/1.324477.
- [13] N. Bacchetta et al. Foxfet biased microstrip detectors: an investigation of radiation sensitivity. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 342:39–48, 1994. doi: 10.1016/0168-9002(94)91408-7.
- [14] E. Barberis et al. Capacitances in silicon microstrip detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 342(1):90–95, 1994. doi: 10.1016/0168-9002(94)91414-1.
- [15] David Barney. Cms slice raw illustrator,. Webseite, 2012. URL <http://cms.web.cern.ch/org/cms-presentations-public>. CMS-doc-5581-v1.
- [16] Christian Barth. Radiation damage of the cms pixel and strips tracker. In 20th RD50 Workshop Bari 30.05., 2012. URL <http://indico.cern.ch/event/175330/session/0/contribution/41/attachments/225123/315033/RD50.pdf>.
- [17] A. G. Bates and M. Moll. A comparison between irradiated magnetic czochralski and float zone silicon detectors using the transient current technique. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 555:113–124, 2005. doi: 10.1016/j.nima.2005.09.020.
- [18] Thomas Bergauer. Design, Construction and Commissioning of the CMS Tracker at CERN and Proposed Improvements for Detectors at the Future International Linear Collider. PhD thesis, Dissertation an der Technischen Universität Wien, 2008.
- [19] Christoph Berger. Elementarteilchenphysik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2002. ISBN 3-540-41515-7.
- [20] Matthias Bergholz. Radiation hard sensor materials for the cms tracker upgrade. Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2011 IEEE, pages 118–121, 2011. doi: 10.1109/NSSMIC.2011.6154463.
- [21] J. Beringer et al. Review of particle physics. Phys. Rev. D, 86, 2012. doi: 10.1103/PhysRevD.86.010001.
- [22] Maria Bernard-Schwarz. Measurements and Irradiation Analysis of Silicon Structures for the CMS Upgrade. PhD thesis, Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien, 2011.

LITERATURVERZEICHNIS

- [23] K. Bethge and U. E. Schröder. Elementarteilchen and Wechselwirkungen. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, 2006. ISBN 3-527-40587-9.
- [24] S. Braibant. Investigation of design parameters and choice of substrate resistivity and crystal orientation for the cms silicon microstrip detector. Technical Report CMS-NOTE-2000-011, CERN Document Server, 2000.
- [25] S. Braibant et al. Investigation of design parameters for radiation hard silicon microstrip detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics, 485(3): 343–361, 2002. doi: 10.1016/S0168-9002(01)02120-9.
- [26] Oliver Bruening et al. LHC Design Report V.1 : the LHC Main Ring. CERN Document Server, 2003. ISBN 978-9-290-83224-9.
- [27] O. Brunner et al. Measurements on the first lhc acceleration module. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, pages 481–483, 2001.
- [28] M. Bruzzi et al. Radiation-hard semiconductor detectors for superlhc. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 541(1-2): 189–201, 2005. doi: 10.1016/j.nima.2005.01.056.
- [29] Mara Bruzzi. Radiation damage in silicon detectors for high-energy physics experiments. IEEE Transactions on Nuclear Science, 48(4):960–971, 2001. doi: 10.1109/23.958706.
- [30] D. Campbell, A. Chilingarov, and T. Sloan. Frequency and temperature dependence of the depletion voltage from cv measurements for irradiated si detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 492(3):402–410, 2002. doi: 10.1016/S0168-9002(02)01353-0.
- [31] PA200 Semi-Automatic Probe Systems - User Guide. Cascade Microtech Inc., pn-m10-107623 edition, 2010.
- [32] CERN public relations. LHC the guide. CERN Document Server, 2009.
- [33] James R. Chelikowsky and Marvin L. Cohen. Electronic structure of silicon. Phys. Rev. B, 10:5095–5107, 1974. doi: 10.1103/PhysRevB.10.5095.
- [34] A. Chilingarov and T. Sloan. Operation of heavily irradiated silicon detectors under forward bias. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 399(1):35–37, 1997. doi: 10.1016/S0168-9002(97)00940-6.
- [35] A. Chilingarov and T. Sloan. Operation of heavily irradiated silicon detectors under forward bias. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 399(1):35 – 37, 1997. doi: 10.1016/S0168-9002(97)00940-6.

LITERATURVERZEICHNIS

- [36] J. L. Chu, G. Persky, and S. M. Sze. Thermionic injection and space-charge-limited current in reach-through p⁺np⁺ structures. Journal of Applied Physics, 43(8):3510–3515, 1972. doi: 10.1063/1.1661745.
- [37] A. Cifta, T. A. Engh, and M. Tangstad. Refining and Recycling of Silicon: A Review. Norwegian University of Science and Technology, 2008.
- [38] CMS Collaboration. Tracker technical design report. Technical Report CERN/LHCC 98-6, CERN Document Server, 1998.
- [39] CMS Collaboration. The cms high level trigger. The European Physical Journal C, 46(3):605–667, 2006. doi: 10.1140/epjc/s2006-02495-8.
- [40] CMS Collaboration. Cms technical design report vol.1. Technical Report CERN/LHCC 2006-001, CERN Document Server, 2006.
- [41] CMS Collaboration. Cms high level trigger. Technical Report CERN/LHCC 2007-021, CERN Document Server, 2007.
- [42] CMS Collaboration. Technical proposal for the upgrade of the cms detector through 2020. JINST 3 S08004, pages 1–361, 2008. doi: 10.1088/1748-0221/3/08/S08004.
- [43] CMS Collaboration. The cms experiment at the lhc. JINST 3 S08004, pages 1–361, 2008. doi: 10.1088/1748-0221/3/08/S08004.
- [44] Contact persons: M. Mannelli, G. Bolla, F. Hartmann, A. Messineo. Specifications for thin p-on-n and n-on-p sensor prototypes for the slhc cms tracker upgrade r & d, February 18, 2009. Internal Note.
- [45] Catalyst Contributors. The Catalyst devel. manual. Addison-Wesley Verlag, 2005. ISBN 3-8273-2253-7.
- [46] T. A. T. Cowell and J. Woods. The evaluation of thermally stimulated current curves. British Journal of Applied Physics, 18(8):377–448, 1967. doi: 10.1088/0508-3443/18/8/302.
- [47] Chris J. S. Damerell. Vertex detectors: The state of the art and future prospects. RAL Preprints, RAL-P-95-008, 1995. URL <http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/ssi95-005a.pdf>.
- [48] Alexander Dierlamm. Silicon sensor developments for the cms tracker upgrade. Journal of Instrumentation, 7(1):C01110, 2012. doi: 10.1088/1748-0221/7/01/C01110.
- [49] Alexander Dierlamm. Characterisation of silicon sensor materials and designs for the cms tracker upgrade. Proceedings of Science, Vertex2012, 2012. ISSN 1824-8039.

LITERATURVERZEICHNIS

- [50] Alexander Dierlamm. slhc sensor development. Webseite, 2013. URL <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/CMS/SLHCSensorDevelopment>. CERN Twiki.
- [51] Abdelhak Djouadi. The anatomy of electroweak symmetry breaking i: The higgs boson in the standard model. Physics Reports, 457(1-4):1–216, 2008. doi: 10.1016/j.physrep.2007.10.004.
- [52] Tommaso Dorigo. Recent results of the cms experiment. ArXiv, Version 1: 1–33, 2012. URL <http://arxiv.org/abs/1204.2406>.
- [53] Marko Dragicevic. The New Silicon Strip Detectors for the CMS Tracker Upgrade. PhD thesis, Dissertation an der Technischen Universität Wien, 2010.
- [54] Marko Dragicevic. Needs of the cms strip tracker. In AIDA-Academica meets industry: Solid state position sensitiv sensors, 2012. URL <https://indico.cern.ch/contributionDisplay.py?contribId=17&confId=158354>.
- [55] Robert Eber. Silicon sensor developments for the cms tracker upgrade. Technical Report CMS-CR-2011-219, CERN Document Server, 2011.
- [56] Robert Eber. Untersuchung neuartiger Sensorkonzepte und Entwicklung eines effektiven Modells der Strahlenschädigung $\tilde{A}_{\frac{1}{4}}$ r die Simulation hochbestrahlter Silizium-Teilchendetektoren. PhD thesis, Dissertation am Institut für Experimentelle Kernphysik - Karlsruher Institut für Technologie, 2013.
- [57] Thomas Eichhorn. Simulationen bestrahlter Siliziumsensoren der Teilchenphysik. PhD thesis, Diplomarbeit am Institut für Experimentelle Kernphysik - Karlsruher Institut für Technologie, 2011.
- [58] J. Ellison, G. Hall, S. Roe, and R. Wheadon. Punch-through currents and floating strip potentials in silicon detectors. IEEE Transactions on Nuclear Science, 36(1):267, 1989.
- [59] Joachim Erfle. Irradiation study of different silicon materials for the CMS tracker upgrade. PhD thesis, Dissertation an der Universität Hamburg, 2014.
- [60] D. J. Fisher. Diffusion in Silicon: 10 Years of Research. Trans Tech Pubn, 1998. ISBN 978-3908450290.
- [61] G. Fisher, M. R. Seacrist, and R. W. Standley. Silicon crystal growth and wafer technologies. Proceedings of the IEEE, 100:1–21, 2012. doi: 10.1109/JPROC.2012.2189786.
- [62] Doris Eckstein for CMS Collaboration. Cms outer tracker detector upgrade plans. Technical Report CMS-CR-2014-008, CERN Document Server, 2014.

LITERATURVERZEICHNIS

- [63] Thomas Pohlsen for CMS Collaboration. Radiation hard silicon sensors for the cms tracker upgrade. Technical Report CMS-CR-2013-405, CERN Document Server, 2013.
- [64] Alexandra Junkes for the CMS Collaboration. Planar silicon sensors for the cms tracker upgrade. Technical Report CMS-CR-2013-082, CERN Document Server, 2013.
- [65] Bernhard Lutzer for the CMS Collaboration. Characterization of irradiated test structures for the cms tracker upgrade. Technical Report CMS-CR-2012-380, CERN Document Server, 2012.
- [66] Teppo Herman Maenpää for the CMS Collaboration. Performance of different silicon materials for the upgraded cms tracker. Technical Report CMS-CR-2013-236, CERN Document Server, 2013.
- [67] Roberto Fornari. Öffentlichkeitsinformationen des instituts für kristallzüchtung. Webseite, 2012. URL http://www.ikz-berlin.de/workgroup_folder/bild/si2.png. Öffentlichkeitsfoto.
- [68] Sabine Frech. Einfluss von Strahlenschäden auf Siliziumstreifensensoren aus unterschiedlichen Grundmaterialien. PhD thesis, Diplomarbeit am Institut für Experimentelle Kernphysik - Karlsruher Institut für Technologie, 2012.
- [69] Sabine Frech. Strip sensor measurements. In Workshop on silicon Strip sensors for the CMS Phase II Upgrade 21.-22.01.2013, 2013. URL <https://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=8&resId=1&materialId=slides&confId=222276>.
- [70] E. Fretwurst et al. Recent advancements in the development of radiation hard semiconductor detectors for s-lhc. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 552(1-2):7–19, 2005. doi: 10.1016/j.nima.2005.05.039.
- [71] Georg Auzinger for the CMS Collaboration. Analysis of testbeam data of irradiated silicon prototype sensors for the cms tracker upgrade. Technical Report CMS-CR-2012-374, CERN Document Server, 2012.
- [72] Stefan Goßner. Grundlagen der Elektronik: Halbleiter, Bauelemente und Schaltungen. Shaker Verlag GmbH, 2002. ISBN 3-8265.8825-8.
- [73] W. Greiner and J. Reinhardt. Theoretische Physik, Quantenelektrodynamik. Verlag Harri Deutsch, 1984. ISBN 3-87144-260-7.
- [74] K. Grotz and H. V. Klapdor. Die schwache Wechselwirkung in Kern-, Teilchen- and Astrophysik. Teubner Verlag Stuttgart, 1989. ISBN 3-529-03035-7.

LITERATURVERZEICHNIS

- [75] J. Härkänen et al. Radiation hardness of czochralski silicon, float zone silicon and oxygenated float zone silicon studied by low energy protons. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 518(1-2):346–348, 2004. doi: 10.1016/j.nima.2003.11.018.
- [76] Frank Hartmann. Evolution of Silicon Sensor Technology in Particle Physics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-540-25094-4.
- [77] D. He, N. Okada, C.M. Fortmann, and I. Shimizu. Carrier transport in polycrystalline silicon films deposited by a layer-by-layer technique. Journal of Applied Physics, 76(8):4728–4733, 1994. doi: 10.1063/1.357240.
- [78] Peter W. Higgs. Broken symmetries and the masses of gauge bosons. Phys. Rev. Lett., 13:508–509, 1964. doi: 10.1103/PhysRevLett.13.508.
- [79] Karl-Heinz Hoffmann. Campaign to identify the future cms tracker baseline. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 658:30–35, 2011. doi: 10.1016/j.nima.2011.05.028.
- [80] Karl-Heinz Hoffmann. Entwicklung von neuen Sensorkonzepten und Untersuchungen an strahlenharten Siliziumstreifensensoren für CMS am Large Hadron Collider in der Hochluminositätsphase. PhD thesis, Dissertation am Institut für Experimentelle Kernphysik - Karlsruher Institut für Technologie, 2013.
- [81] M. Huhtinen. Simulation of non-ionising energy loss and defect formation in silicon. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 491: 194–215, 2002. doi: 10.1016/S0168-9002(02)01227-5.
- [82] Ulrich Husemann. Experimentelle elementarteilchenphysik (p23.1.1). Webseite, 2009. URL http://www-zeuthen.desy.de/~husemann/teaching/2009_ss/exp_teilchenphysik/. Vorlesungsskript.
- [83] Mika Hutingen. The Radiation Environment at the CMS Experiment at the LHC. PhD thesis, Dissertation at Helsinki University of Technology, 1996.
- [84] Jorge J. Moré. The levenberg-marquardt algorithm - implementation and theory. Numerical analysis, pages 105–116, 1978.
- [85] Joachim Erflé for the CMS Collaboration. Silicon sensor developments for the cms tracker upgrade. Technical Report CMS-CR-2011-171, CERN Document Server, 2011.
- [86] Alexandra Junkes. Influence of radiation induced defect clusters on silicon particle detectors. PhD thesis, Dissertation an der Universität Hamburg, 2011.
- [87] Katja Klein for the CMS Collaboration. Upgrade of the cms tracker. Technical Report CMS-CR-2013-403, CERN Document Server, 2013.

LITERATURVERZEICHNIS

- [88] Rolf Kaufmann. Development of Radiation Hard Pixel Sensors for the CMS Experiment. PhD thesis, Dissertation an der University of Zurich, 2001.
- [89] Model 2400 Series SourceMeter - User Manual. Keithley Instruments Inc., 2400s-900-01 edition, 1998.
- [90] Model 6485 Picoammeter Model 6487 Picoammeter/ Voltage Source - User Manual. Keithley Instruments Inc., 6487-900-01 edition, 2003.
- [91] L. C. Kimerling. New developments in defect studies in semiconductors. IEEE Transactions on Nuclear Science, 23(6):1497–1505, 1976. doi: 10.1109/TNS.1976.4328529.
- [92] W. Koch, A. L. Endrös, D. Franke, C. Häßler, J. P. Kalejs, and H. J. Möller. Bulk Crystal Growth and Wafering for PV. John Wiley & Sons, Ltd, 2005. doi: 10.1002/0470014008.ch6.
- [93] Michael Kofler. MYSQL5: Einführung, Programmierung, Referenz. Addison-Wesley Verlag, 2005. ISBN 3-8273-2253-7.
- [94] Andreas Kornmayer. Untersuchungen zur Signalkopplung an neuartigen Siliziumstreifensensorgeometrien. PhD thesis, Diplomarbeit am Institut für Experimentelle Kernphysik - Karlsruher Institut für Technologie, 2011.
- [95] G. Kramberger et al. Superior radiation tolerance of thin epitaxial silicon detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 515(3):665–670, 2003. doi: 10.1016/j.nima.2003.07.021.
- [96] Manfred Kramer. Silicon detectors. In XI ICFA School on Instrumentation 11.-22.01., 2010. URL <http://fisica.cab.cnea.gov.ar/particulas/html/icfa/schedule.php>.
- [97] M. Laakso. Evaluation of foxfet biased ac-coupled si strip detector prototypes for cdf svx upgrade. Technical Report Fermilab-TM-1772, Fermi National Accelerator Laboratory, 1992.
- [98] Lev Davidovich Landau. On the energy loss of fast particles by ionization. J. Phys. (USSR), 8(4):201–205, 1944.
- [99] I. Lazanu and S. Lazanu. Radiation defects in silicon due to hadrons and leptons, their annealing and influence on detector performance. Phys. Scripta, 66:125–132, 2002. doi: 10.1238/Physica.Regular.066a00125.
- [100] I. Lazanu and S. Lazanu. Lindhard factors and concentrations of primary defects in semiconductor materials for uses in hep. ArXiv, 2003. ISSN HEP-PH/0301080. URL <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0301080>.

LITERATURVERZEICHNIS

- [101] H. Lee, K. Lee, and S. Hahn. Computational simulation of melt flow in magnetic czochralski growth process. Korean Journal of Chemical Engineering, 6:105–111, 1989. doi: 10.1007/BF02697487.
- [102] H. Lefèvre. Trap-centers of self-interstitials in silicon. Applied physics, 22: 15–22, 1980. doi: 10.1007/BF00897926.
- [103] LHC Higgs Cross Section Working Group. Handbook of lhc higgs cross sections: 1. inclusive observables. ArXiv, 2011. URL <http://arxiv.org/abs/1101.0593>.
- [104] LHC Higgs Cross Section Working Group. Handbook of lhc higgs cross sections: 2. differential distributions. ArXiv, 2012. URL <http://arxiv.org/abs/1201.3084>.
- [105] Z. Li, E. Verbitskaya, V. Eremin, B. Dezillie, W. Chen, et al. Radiation hard detectors from silicon enriched with both oxygen and thermal donors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 476:628–638, 2002. doi: 10.1016/S0168-9002(01)01651-5.
- [106] David R. Lide. Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press, Inc., 1995. ISBN 0-8493-0476-8.
- [107] G. Lindström, M. Moll, and E. Fretwurst. Radiation hardness of silicon detectors-a challenge from high-energy physics. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 426(1):1–15, 1999.
- [108] G. Lindström et al. Radiation hard silicon detectors-developments by the rd48 (rose) collaboration. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 466:308–326, 2001. doi: 10.1016/S0168-9002(01)00560-5.
- [109] G. Lindström et al. Developments for radiation hard silicon detectors by defect engineering-results by the cern rd48 (rose) collaboration. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 465:60–69, 2001. doi: 10.1016/S0168-9002(01)00347-3.
- [110] J.L. Lindström et al. Interaction between self-interstitials and the oxygen dimer in silicon. Physica B Condensed Matter, 308:284–289, 2001. doi: 10.1016/S0921-4526(01)00694-9.
- [111] J. Lohstroh, J. J. M. Koomen, A. T. Van Zanten, and R.H.W. Salters. Punch-through currents in pnp and npn sandwich structures i: Introduction and basic calculations. Solid-State Electronics, 24(9):805 – 814, 1981. doi: 10.1016/0038-1101(81)90095-2.
- [112] Bernhard Lutzer. Measurements and Irradiations of Test Structures for the CMS Tracker Upgrade. PhD thesis, Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien, 2012.

LITERATURVERZEICHNIS

- [113] B. C. MacEvoy, A. Santocchia, and G. Hall. Defect-engineering rad-hard particle detectors: the role of impurities and inter-defect charge exchange. Physica B: Condensed Matter, 273-274:1045–1049, 1999. doi: 10.1016/S0921-4526(99)00635-3.
- [114] I. Mandic, V. Cindro, G. Kramberger, M. Mikuz, and M. Zavrtanik. Charge-collection efficiency of heavily irradiated silicon diodes operated with an increased free-carrier concentration and under forward bias. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 533:442–453, 2004. doi: 10.1016/j.nima.2004.06.134.
- [115] Stephen P. Martin. A supersymmetry primer. ArXiv, Version 6:1–156, 2011. URL <http://arxiv.org/abs/hep-ph/9709356>.
- [116] R. Menzel, A. Rost, A. Luedge, and H. Riemann. Influence of reduced working frequencies on the floating-zone growth of silicon single crystals. Crystal Research and Technology, 46(10):1003–1009, 2011. doi: 10.1002/crat.201100230.
- [117] Stefano Mersi. Mssd source measurements. In Workshop on silicon Strip sensors for the CMS Phase II Upgrade 21.-22.01.2013, 2013. URL <https://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=17&resId=0&materialId=slides&confId=222276>.
- [118] S.R. Messenger et al. Nonionizing energy loss (niel) for heavy ions. IEEE Transactions on Nuclear Science, 46(6):1595–1602, 1999. doi: 10.1109/23.819126.
- [119] M. Moll, E. Fretwurst, and G. Lindström. Leakage current of hadron irradiated silicon detectors - material dependences. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 426(1):87–93, 1999.
- [120] Michael Moll. Radiation Damage in Silicon Particle Detectors - Microscopic defects and macroscopic properties. PhD thesis, Dissertation an der Universität Hamburg, 1999.
- [121] Michael Moll. Radiation tolerant semiconductor sensors for tracking detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 565(1):202–211, 2006. doi: 10.1016/j.nima.2006.05.001.
- [122] B. N. Mukashev, K. A. Abdullin, and Y. V. Gorelkinskii. Metastable and bistable defects in silicon. Physics-Uspekhi, 43(2):139, 2000.
- [123] R. C. Newman. Defects in silicon. Reports on Progress in Physics, 45(10):1163, 1982.
- [124] A. Nürnberg and T. Schneider. Lorentz angle measurements as part of the sensor r&d for the cms tracker upgrade. Journal of Instrumentation, 8(01):C01001, 2013.

LITERATURVERZEICHNIS

- [125] E. Obermeier and P. Kopystynski. Polysilicon as a material for microsensor applications. Sensors and Actuators A: Physical, 30(1-2):149–155, 1992. doi: 10.1016/0924-4247(92)80210-T.
- [126] H. Ohyama et al. Radiation damage of polycrystalline silicon films. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 186(1-4):176–180, 2002. doi: 10.1016/S0168-583X(01)00920-X.
- [127] Maik Ritter. Css 4 you v3.6. Webseite, 2004-12. URL <http://www.css4you.de/>. Online Dokumentation.
- [128] Jonathan L. Rosner. The standard model in 2001. ArXiv, pages 1–56, 2001. URL <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0108195>.
- [129] I. Ruge and H. Mader. Halbleiter-Technologie: Halbleiter-Elektronik. Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 978-3540538738.
- [130] Nicole Santen. Dotierungsabhängigkeit des elastischen Verhaltens von Silizium. PhD thesis, Dissertation an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2009.
- [131] A. Savitzky and M. J. E. Golay. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. Analytical Chemistry, 36(8):1627–1639, 1964. doi: 10.1021/ac60214a047.
- [132] A. Schenk. Rigorous theory and simplified model of the band-to-band tunneling in silicon. Solid-State Electronics, 36(1):19 – 34, 1993. doi: 10.1016/0038-1101(93)90065-X.
- [133] John Y. W. Seto. The electrical properties of polycrystalline silicon films. Journal of Applied Physics, 46(12):5247–5254, 1975. doi: 10.1063/1.321593.
- [134] Vadim Siklitsky. New semiconductor materials. characteristics and properties. Webseite, 1998-2001. URL <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/>. Online Datenbank.
- [135] W. H. Smith et al. CMS The TriDAS Project - Technical Design Report, Volume 1: The Trigger System. Technical Report CERN/LHCC 2000-38, CERN Document Server, 2000.
- [136] L. Snoj, G. Zerovnik, and A. Trkov. Computational analysis of irradiation facilities at the jsi triga reactor. Applied Radiation and Isotopes, 70(3):483 – 488, 2012. doi: 10.1016/j.apradiso.2011.11.042.
- [137] U. Soldevila. Radiation-hard silicon for lh-lhc trackers. Journal of Instrumentation, 6(12):C12035, 2011.

LITERATURVERZEICHNIS

- [138] I. Stavitski, R. Rando, D. Bisello, N. Bacchetta, A. Candelori, A. Kaminski, and J. Wyss. Charge collection efficiency of standard and oxygenated silicon microstrip detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 485(1-2):105–1088, 2002.
- [139] Georg Steinbrück. The 2s prototype module in cms. In CEC General Meeting, 2012. URL <http://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=1&sessionId=0&resId=1&materialId=slides&confId=176828>.
- [140] Georg Steinbrück. Towards radiation hard sensor materials for the cms tracker upgrade. Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2012 IEEE, pages 1828–1832, 2012. doi: 10.1109/NSSMIC.2012.6551426.
- [141] R. M. Sternheimer. The density effect for the ionization loss in various materials. Phys. Rev., 88:851–859, 1952. doi: 10.1103/PhysRev.88.851.
- [142] Jörg Strahl. Defect Characterization in High-Purity Silicon after Gamma and Hadron Irradiation. PhD thesis, Dissertation an der Universität Hamburg, 2004.
- [143] S. M. Sze. Semiconductor Devices Physics and Technology. John Wiley & Sons, Inc., 2001. ISBN 0-471-33372-7978-9-290-83224-9.
- [144] L. M. Terman. An investigation of surface states at a silicon/silicon oxide interface employing metal-oxide-silicon diodes. Solid-State Electronics, 5(5):285 – 299, 1962. doi: 10.1016/0038-1101(62)90111-9.
- [145] M.-A. Trauwaert et al. Low-temperature anneal of the divacancy in p-type silicon: A transformation from v2 to vxoy-complexes. Applied Physics Letters, 66(22):3056–3057, 1995. doi: 10.1063/1.114276.
- [146] Wolfgang Treberspurg. Manufacturing Process of Silicon Strip Sensors and Analysis of Detector Structures. PhD thesis, Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien, 2011.
- [147] R. Turchetta. Spatial resolution of silicon microstrip detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 335(1-2):44 – 58, 1993. doi: 10.1016/0168-9002(93)90255-G.
- [148] M. Valentan et al. Comparison of n-side strip isolation methods for silicon sensors. Journal of Instrumentation, 7(11):P11020, 2012.
- [149] T. S. van Albada, J. N. Bahcall, K. Begeman, and R. Sancisi. Distribution of dark matter in the spiral galaxy ngc 3198. Astrophysical Journal, 295:305–313, 1985. doi: 10.1086/163375.

LITERATURVERZEICHNIS

- [150] Laary Wall. Perl 5 documentation. Perl community, 2013. URL <http://perldoc.perl.org/>.
- [151] George D. Watkins. Intrinsic defects in silicon. Materials Science in Semiconductor Processing, 3(4):227–235, 2000. doi: 10.1016/S1369-8001(00)00037-8.
- [152] N. Wermes. Pixel vertex detectors. ArXiv, 2006. URL <http://arxiv.org/abs/physics/0611075>.
- [153] T. I. Westgaard, B. S. Avset, N. N. Ahmed, and L. Evensen. Radiation hardness of punch-through and fet biased silicon microstrip detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 377:429–434, 1996. doi: 10.1016/0168-9002(96)00216-1.
- [154] Renate Wunstorf. Systematische Untersuchungen zur Strahlenresistenz von Siliziumdetektoren für die Verwendung in Hochenergiephysikexperimenten. PhD thesis, Dissertation an der Universität Hamburg, 1992.
- [155] J. Yeager and M. A. Hrusch-Tupta. Low Level Measurements Handbook 6th edition. Keithley Instruments Inc., 2004.

LITERATURVERZEICHNIS

Appendix A

Handbuch der Messsoftware

Manual

for the DESY Zeuthen measurement software

MeasureSoft

Manual Version : 1.01

Related Program Version : 2.18-22.10.2013

matthias.bergholz@desy.de

+49 33762 7-7656

A.1 Introduction

This manual deals with the measurement software “MeasureSoft”. MeasureSoft allows to control measurements on the probe station “PA200” in room 2H/109 or to do stand-alone measurements. The functionalities are:

- Setup and control of all measurement devices and voltage sources.
- Setup and control of the probe station “PA200” from Cascade.
- Store all measurement results in one of the DESY Zeuthen databases.¹
- Perform data analysis

A.1.1 Special remarks about the layout

The layout of the software consists of three parts:

- The first screen is for general settings of the measurement, page 147.
- On the second screen the measurement can be started and the results are shown, page 155.
- The third screen is for specific settings, page 158.

The layout of the software has special rules:

- **Blue** buttons with white letters points to subroutines e.g. “clear input fields”.²
- **Red** or **green** buttons select options and are part of the measurement setting.
- **Gray** and white input fields allow the user to enter numbers that specify the setting. **Thereby, the value “9999” always means that an input is ignored!**
- **Black** selection buttons with white letters allow to select one of the predefined options.

A.1.2 Change Defaults

To change defaults values Labview have to be switched off. Than the values can be change. To save the changes the right mouse key have to be clicked and the option “Data options \Make Current Value Default” have to be pressed. Than save the current program code. **Please not delete or overwrite old entries in the measurement selection options!**

¹“CECDB” for the CMS- and FCAL-group and “ASDB” for the ATLAS-group

²Subroutines that open additional screens, like “create XY-Table”, can be only started if the inputs are right.

A.2 Start a measurement

Before starting a measurement Labview itself has to be launched. For more information about Labview read the manual of Labview.

Afterwards the Software can be loaded from the file “MeasureSoft.vi”. Labview is started with the Labview arrow-button. Thus all default settings are loaded. In case of error messages please check primarily:

- An existing internet connection,
- A valid AFS token³,
- if everything is switched on.

The measurement setting can be started afterwards. Examples of measurement settings are in the file “Public\MeasurementData\MeasurementRules\Examples.ppt”.

A.3 Setting Screen

This screen is for the basic measurement settings.

A.3.1 Set the Voltage Ramping (*upper left corner*)

The input of the voltage ramps are organized in an array form and the settings can be entered very freely. The only requirement is, that the start voltage of the next active region ⁴ is the end voltage of the previous active region⁵. A voltage ramp is defined for every region with the following inputs:

- Start voltage
- End voltage
- Voltage step⁶
- Delay time between supplement of the voltage and begin of the measurement
- Number of measurement values for each voltage step
- Delay time between each measurement point for the current voltage
- Number of values that should be considered for the calculation of the average value for each voltage step⁷

³\Netinstall Programs\Communication\OpenAFS\Authentication;
Enter the login data of the CMSDAQ account

⁴name for a row in this array

⁵Regions marked with the attribute “delete” and “insert” are handled as active, too!

⁶Have to be positive, none zero and smaller or equal than the difference between start and end voltage.

⁷Counted from the last value.

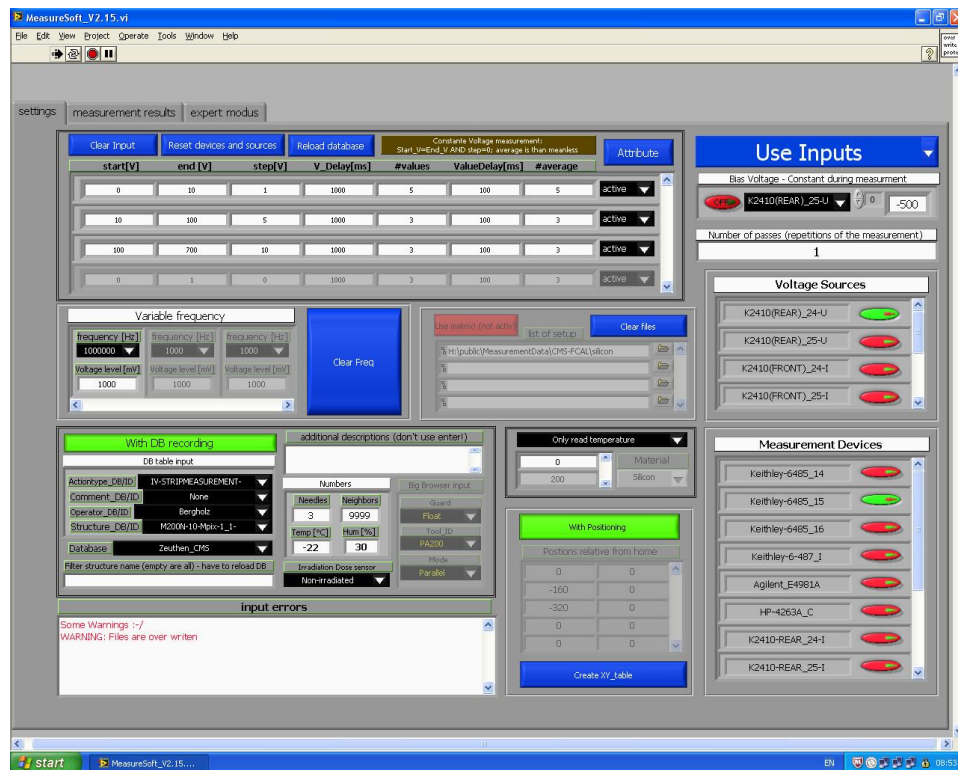


Figure A.1: General setting screen

If needed enter the next voltage region, figure A.1. In the first region the voltage is ramped from 0 to 10 V in 1 V intervals and then from 10 V to 100 V in 5 V intervals.

Set a constant voltage measurement MeasureSoft allows measuring a value over time at a constant voltage. For this option these steps have to be done:

- Select the voltage by typing in the fields “start voltage” and “end voltage” the value of the voltage and enter Zero for the voltage step.
- Enter the delay time between begin of the voltage supply and begin of the measurement.
- Enter the number of values to be measured for this voltage and the delay time between each measurement point.
- *The input “average” is ignored for this option.*

It is possible to combine measurements of variable and constant voltage.

Each region have an attribute. The available attributes are:

- **Active** - This region is measured
- **Inactive** - This region is ignored during the measurement
- **Insert** - Inserts a new region before the current region by pressing the button “attribute”
- **Delete** - Deletes this region by pressing the button “attribute”

Please notice that regions with the attribute “insert” and “delete” will be handled as active during a measurement!

Additional actions In this first input part additional actions can be started:

- **Clear input** - Resets all inputs to the default values
- **Reset devices and sources** - Reloads all settings for the devices and sources
- **Reload database** - Reloads all inputs from the database. This takes some time, but should not take longer than two minutes. The structure name filter in the field “Filter Structures” is activated with this option ⁸. To save the new stuctures a user dialog is open, chapter A.1.2.

A.3.2 Set the Frequencies for the LCR Meter (*upper left center*)

For capacitance measurements⁹ the frequency and voltage amplitude can be set. **Please notice that not every device can supply every frequency.**¹⁰

It is possible to enter more than one frequency by selecting another field in the array. The measurement will be performed with the first frequency and than switches to the others. For each frequency an individual data file is produced and the frequency is added to the file name. Additionally to the frequency, a frequency amplitude can be set in the range from 5 mV to 1 V in 5 mV intervals. With the button “ClearFreq” all frequency inputs are reset.

A.3.3 The Inputs for the Database (*lower left center*)

The input parameters for the database can be set. At first, decide if using the database or not. Utilize the button “UseDB”. **In general, all relevant measurements have to be stored in the database!!!**

⁸Use this to increase the load speed

⁹Automatically detected with the selections of the measurement devices

¹⁰If insecure read the manual of the device or ask an expert.

To store data in the database all necessary entries have to be made:

- **Action type** - Describe the measurement e.g. “IV-curve of the bias ring”
- **Comment** - Select on predefined annotation that describes the measurement e.g. “With coupling box”
- **Operator** - Name the person doing the measurement¹¹
- **Structure name** - Name the structure of the measurement¹².

Never use the entries “not specified” or “OLD” because then the database entries becoming meaning-less. After finishing these mandatory entries additional entries can be made. Those are:

- Selection of the storage database
- Enter non pre-define comments in the comment field. **It is not allowed to use “enter”!**
- Enter the number of needles using in the measurement. ¹³
- Enter the number of neighbors ¹⁴
- Enter the measurement temperature ¹⁵
- Enter the humidity if not readout from sensors.
- Enter the irradiation dose of the measured sensor.

The next three entries are not stored in the Zeuthen databases. Nevertheless they are written to the file and can be an important information. These are answers to the following questions:

- Is the guard ring connected or floating?
- Which measurement setup, e.g. probe station, was used?
- Was the (capacitance) measurement performed in serial or parallel mode?

A.3.4 Input Errors (*bottom left*)

All user inputs are checked if they fulfill the necessary requirements. If this is not the case, an error message is shown. Thus it is not possible to start the measurement. Also warnings for some input settings are placed here.

¹¹A database account is mandatory to be included ;-). It will be done by one of the database administrators.

¹²This setting is only relevant if not using the positioning option, page 151

¹³The wedge card needles are not counted!

¹⁴This is relevant e.g. for interpixel capacitance measurements.

¹⁵Not relevant if the temperature is read out from the probe station

A.3.5 Measurement Selection (*upper center*)

Set different measurement types for one sample position if a switching matrix is used. The setting for each measurement is then loaded from the selected setup files, chapter A.3.8. The setting of the switching matrix itself can be done on the expert screen A.5. *This option is currently not available but fully implemented.*

A.3.6 Chuck Temperature (*lower center*)

The temperature of the probe station is set. This option works, **but no correction of position change for the new temperature is implemented**¹⁶.

To activate this option, use the selection button and set the temperature in the range of -40 to +200 °C. Once again this input is an array. It is possible to enter more than one value. If preferred the first temperature will be supplied and then all measurements and chuck movements will be done for this chosen temperature. Afterward the other temperatures are set and for each temperature the measurements will be repeated. If desired the temperature of the probe station is readout and written in the data file for each voltage step.

A.3.7 Chuck Movement (*bottom center*)

During a measurement it is possible to change the X- and Y-position of the probe station automatically.

Before using this option move the chuck to the contact high and bring the needles in contact. **If you are not sure what to do, read the manual of the probe station or ask an expert. Wrong handle can destroy the test device!!!**

Create XY table Decide on the moving distances and press the blue button “Create XY-table”. Thus an additional input screen, figure A.2, opens. Enter the movement distance for X and Y in micro meter and number of movements in that directions. Additionally enter the option “alternate”. This means that the movement change the direction (180°) every step. By pressing the “Create”-button the table with the movement distances is filled, (*noted in the gray framed box*). Finally enter for each position the structure name¹⁷.

If the structure names have some regularity, the auto selection options can be used. For example if the structure name is like “Name1_RunningNumber_Name2” enter in the field “Filter1” the first name and in the field “Filter2” the second name. Thus decide if starting to count from the beginning or the end of the structure list. Enter the number of the first structure. Finally decide how large the counting steps should be (e.g. every second). By pressing the button “Create” the related structures are selected according to the positions.

¹⁶This problem is solved by a waiting routine that gives time to adjust the right position for each temperature.

¹⁷A pre-selection of the structure names can be done with the database load option of the main program.

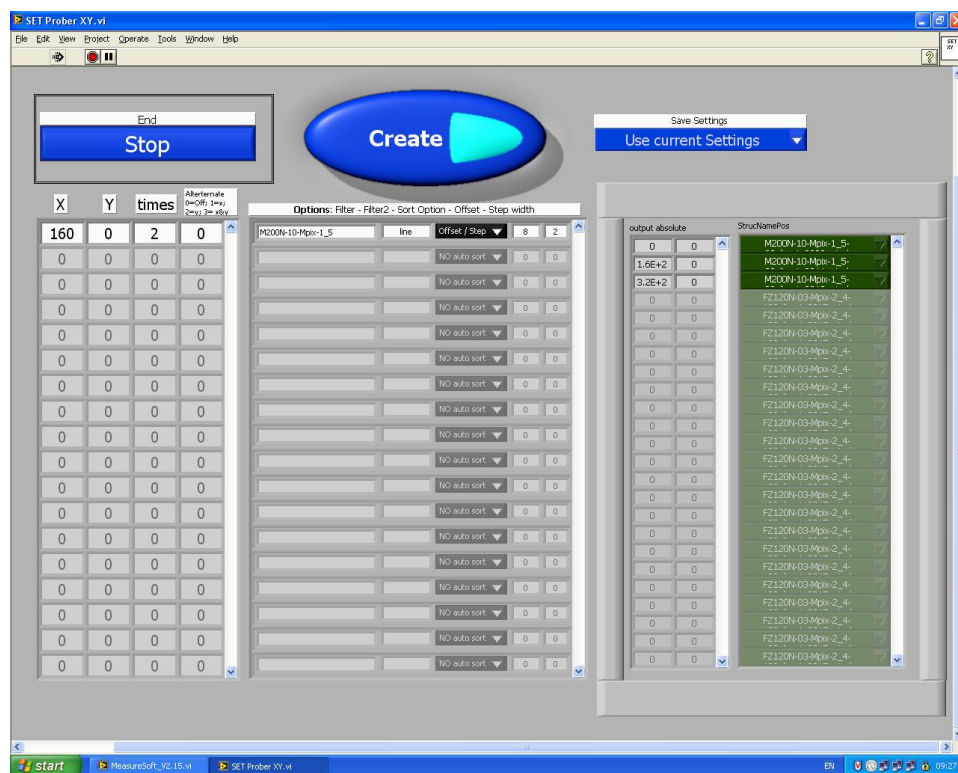


Figure A.2: Interface of the SubVI “XY table”

The option “save settings” saves the inputs in a text file for a later use. These files can be loaded with this button, too. The option “settings to default” set all input to the default ones. *Other boxes can be ignored, because they are internal variables.* By ending the SubVI with the “end”-button, all generated output will be transferred to the main program. Additionally the option “With Positioning” is activated and the inputs of this SubVI are kept for a later usage as long as the main program is not closed.

Trouble Shooting

- Check if for each position a structure name was selected.
- If not using the positioning the structure name of the database input field is used!
- Due to the file name generation, it is possible that file names are doubled. **Then existing files are overwritten!**
- If doing measurements over a large area alignment of the sample is necessary¹⁸. **Control that the change in Z-direction is negligible.**

A.3.8 Save and Load Measurement Settings (*right side, top*)

After entering all settings correctly, they can be saved with the button “User Inputs”. Then a file dialog opens and the file name has to be entered ¹⁹.

By using this button also settings from older measurements can be loaded. If the file was generated with an earlier version of MeasureSoft an error message appears. **Then it is necessary to check if the input was imported correctly!** Thus, save the input again for the new software version.

A.3.9 Select a Constant Bias Voltage (*right side, top middle*)

Additionally to the ramped voltage, a constant bias voltage can be supplied. For usage select the source and enter the voltage wanted. Negative and positive inputs are possible. **Be aware that this option is not identical with constant voltage measurements, page 148.**

It is possible to measure over more than one bias voltage. Therefore enter all voltages wanted to be measured. For each voltage a new file is used. **It isn't possible to select a source already used for the voltage ramp, chapter A.3.10**

A.3.10 Passes (*right side, central middle*)

Enter how often an identical measurement should be repeated. For each turn an individual file is created.

¹⁸See in the Cascade manual for the ProberBench Software

¹⁹Please notice that the file format have to be '.txt' and also the settings from the expert screen are saved.

A.3.11 Select the Voltage Source (*right side, lower middle*)

Select the voltage source(s) that should be ramped during the measurement²⁰. It is possible to change the name of the source. This name is saved in the protocol and data file. **It is not possible to select a source already used for the bias voltage, chapter A.3.9**

A.3.12 Select the Measurement Device (*right side, bottom*)

Select the measurement device(s) that should be used. If selecting a LCR meter this will be detected automatically. The entered frequency will be used, page 149. It is possible to change the name of the devices, e.g. to the measured structure. This name is saved in the protocol file. Please notice, that if a device supports different measurement options like current, voltage or resistance **it is only possible to use one of these options for each device!** A common mistake is that one of the selected devices have to be selected for the data analysis on the expert screen!

²⁰also for time dependent measurements

A.4 Measurement Screen

After complete all settings the measurement can be started. Use for that the red button “Start measurement”.

On the top of the left it is possible to select the device that should be shown during the measurement²¹. The upper plot shows the results for each voltage step. Whereby the lower plot shows the result over all voltages.

On the right side the current values of each device the measured, the temperature, the supplied voltage, the readout of the dew point sensors, the temperature of the probe station and the time since the measurement has started are shown.

Additional there is a status field that shows all relevant actions and error messages during the measurement. To quit the measurement repress the “Start” button again. If wanting to make a break and continue later then press the “Pause” button. The measurement continues by pressing this button again.

Please notice that a measurement only starts after all other SubVI’S are closed and the inputs are right. It is not allowed to change any inputs during a measurement running²²

A.4.1 What Happens during a Measurement?

1. Before the measurement starts everything is initialized and the devices and sources are setup, see page 158.
2. The user is requested to enter a file name
3. The probe station is set if one of the options “with positioning” or “readout temperature” is selected.
4. Then nested loops over all options starts. They run in the following order:
 - (a) Over all passes
 - (b) Over all temperatures
 - (c) Over all positions²³
 - (d) Over all measurement types selected with the switching matrix option
 - (e) Over all frequencies if a LCR meter is used
 - (f) Over all active regions
 - (g) Over all voltage steps of one region

²¹The view is only updated if a new voltage is supplied

²²except the option “notify device”. Otherwise this could lead to unpredictable errors!

²³The structure name of this position is added to the name of the file. It is taken from DB input if not using the option “with positioning” or is taken from the structure list generated with the SubVI “create XY-table”

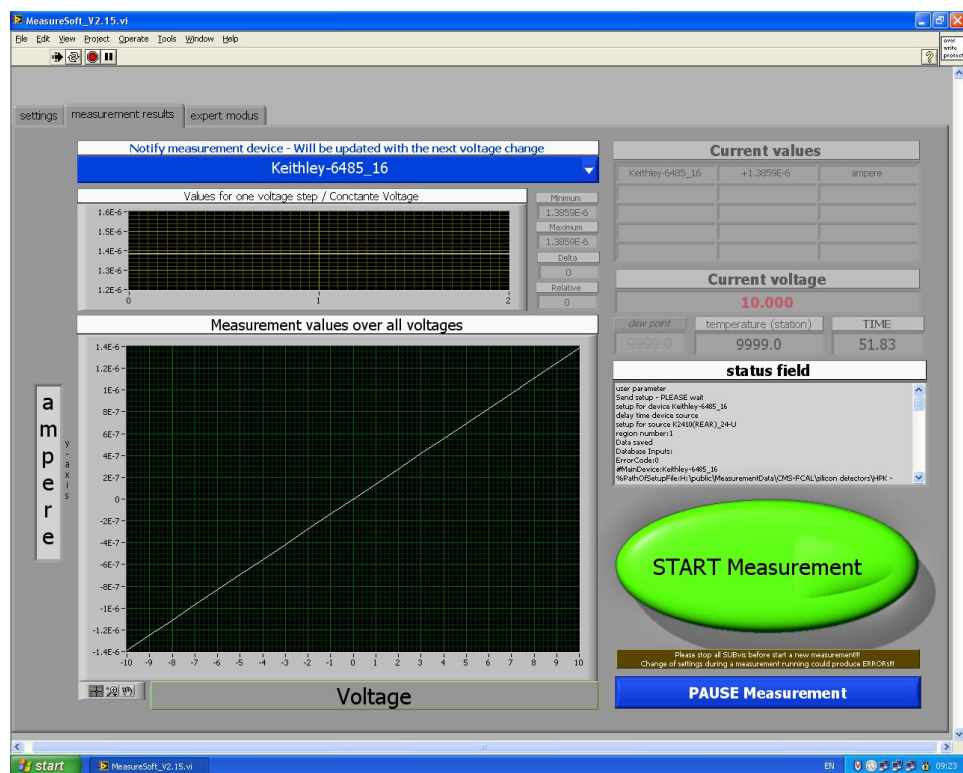


Figure A.3: Measurement screen

For each pass, temperature, position, measurement type and frequency a separate data file is stored. After all measurements the voltage is ramped up to the stand by voltage. Also the data is written to the database, the protocol file is generated and the collection data file is created, chapter A.5.2.

A.5 Expert Screen

This Screen is for more experienced settings. On the upper left corner it is possible to start three different SubVI's to change the settings of the device, source and switching matrix.

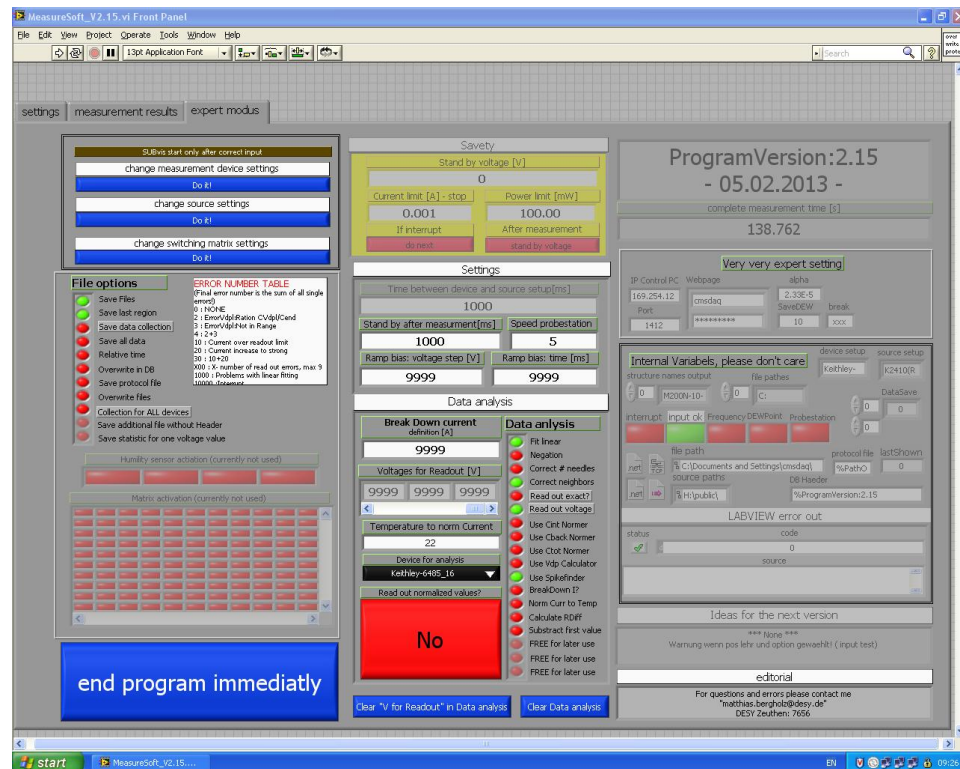


Figure A.4: Expert screen

A.5.1 Device, Source and Matrix Settings (left top)

The SubVI for the device setting is shown in figure A.5. It is a string list of the setting of devices and include special input fields for the Phillips Volt meters, Keithley Picoammeters and the frequency for LCR meters. The setting of one device consists of:

- The device name
- The (GPIB)-address
- The setup string (*read the device manual*)
- The execute order for data taking (*again: read the manual*)
- The number of read out bytes (*hope you have already read the manual*)

- The start byte of data into the output data
- The end byte of data into the output data
- The device unit e.g. Ampere, Farad, Ohm or Volt ²⁴

Select one of the devices and one of this options:

- Change the device setup
- Change the order of the devices
- Create a new device
- Delete an old device
- Special options for the Phillips PM2525, Keithley and LCR meter devices where the input of the related boxes is written into the setup file.

With the third selection button it is possible to save or load a backup file. After having made all necessary changes, close the program with the “End” button. All settings are automatically overtaken in the main program.

For Experience User All settings are saved in the file “DeviceList.txt”. In this file, everything is available in a spread sheet string. Changes can be made by hand and is possible to manipulate the strings. For loading new settings press the “Reload device and source settings”-button on the first screen of the main program. The setting of source and matrix work accordingly as the setting for the devices.

Source Setup For each source two SubVIs exists. The first one setup the source and the second one updates the voltage. A source is defined in the setting file “SourceList.txt” by

- The name
- The address
- The relative path and file name of the voltage setting SubVI

The Setup SubVI for a source must have the same name ending with ‘-setup’.

switching matrix The switching matrix setting SubVI generates a two dimensional array which are equal to the preferred switches of the matrix.

²⁴This specify some of the data analysis options

APPENDIX A. HANDBUCH DER MESSSOFTWARE

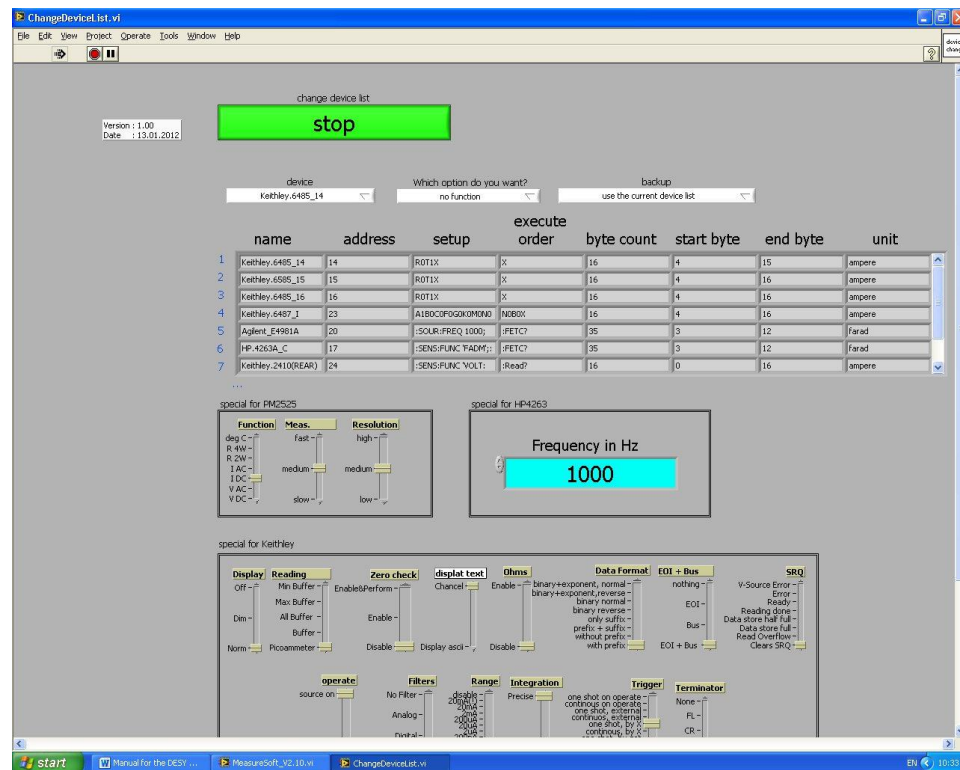


Figure A.5: Screen of the change device list SubVI

A.5.2 Files Options (left middle)

Select what should be saved

- **Save files** - Saves files in general
- **Save last region** - Save the last region of the measurement²⁵
- **Save collection file** - Save a file with the collected data²⁶ over all measurements performed for the main device, page 164 “—DataCollection.txt”
- **Save all data** - Save all measurement points for all devices and voltages in an additional file “—ALLData.txt”
- **Relative time** - Store the time as time stamp or as relative time from the begin of the measurement
- **Overwrite DB** - Overwrites existing files in the database without any error message

²⁵Not usable if only one active region exists

²⁶Data are negated, corrected with the numbers of needles or neighbors and substrated with the first value

- **Save protocol file** - Saves a protocol file with all settings and messages of the status field for each measurement “—Protocol.txt”
- **Overwrite files automatically** - Overwrites local files that already exist without any user prompt. **Be careful, file names are generated!**
- **Save additional file without database header** - Generates an additional pure data file without the header of the database “—Pure.txt”
- **Statistic for one voltage value** - Save additionally to the average value statistic values for each voltage step e.g. standard derivation, minimum and maximum value
- **Remove special characters** - Remove special characters from file name, defined in the related input field “special characters”

General comments for file generation

If the measurement was stopped by an interruption of the user or by violation of one safety setting to the filename the ending “—interrupt” is added. A standard measurement data file looks like:

1. A header with all inputs for the database
 - A generated error code, page161
 - Lines start with “%” are comments and will not be imported
 - Lines start with “#” are only relevant for the database export to the CEC database.
 - Everything else is read into the Zeuthen databases. The format is “parameter_name”“:”“value”
2. The measurement data starts with the line “Voltage Time Device1 Device2 Statistics ... Org-Data²⁷”
3. The values for each column are written in an exponential format in the next lines

Error codes Some outputs are checked during data analysis. If any error occurred an error code is generated. Then the sum of all errors is written into the file. Error code meaning is written in the table below A.1.

²⁷Original data of the main device are always saved in an additional column

Error code	Meaning
0	None
2	V_{Depl} calculation: Ratio CVdpl/Cend
3	V_{Depl} calculation: Calculated voltage is not in range
4	Case 2 and 3 together
10	Current is beyond readout limit
20	Current increases too strong
30	Case 10 and 20 together
X00	X - Number of errors during readout of voltage, <i>max</i> 9
1000	Problems occurred with the linear fitting
1000	Resistance higher than infinity limit
10000	An interruption occurred
100000	The Peak Finder founds spikes and corrected it
1000000	V_{PT} : Punch-Through-voltage fit fails
2000000	V_{PT} : Too less point for Punch-Through-voltage
4000000	V_{PT-Dev} : Method fails
10000000	V_{Depl} : Derivation-Method fails
20000000	V_{Depl} : Fit-Method fails
40000000	V_{Depl} : Too less fit points
80000000	V_{Depl} : Calculated voltage is not in Range
100000000	Slope calculation for R_{Diff} fails

Table A.1: **List of error codes.** The final error code is the sum of all error codes

A.5.3 Humidity Sensor activation (*left bottom*)

Select and deselect the humidity sensors ²⁸ which are connected to the probe station. If at least one sensor is selected the average of all is written into the DB-file. This overwrites the value entered manually by hand in the DB input.

A.5.4 Matrix Activation (*left bottom*)

Define how the bridges of the switching matrix are open or close. *Option is implemented but deactivated.*

A.5.5 End program immediately (*left bottom*)

Stop the program immediately, designed as emergency stop. **Everything is lost!**

A.5.6 Safety (*top center*)

Set safety functions. Set the stand by voltage after measurement, a current and a power limit where the measurement stops what create an interruption, and two options of what should be done in this case.

- Stop the measurement or do the next measurement.
- Go back to the stand by voltage or use voltage as by interruption.

*Changes of the safety settings are only possible if Labview is **NOT** running!*

A.5.7 General Settings (*center middle*)

Enter some general settings:

- Delay time between proceed the setup of the sources and the devices. It has to be at least 0.5 s if wanting to use an apparatus as source and measurement device
- It should be at least 0.5 s to be sure that the voltage is ramped down and everything is saved
- Speed of movement of the probe station, in percent of the maximum speed
- Define how fast the constant bias voltage, page 153, is ramped up in width of voltage steps and time per step

²⁸SHT Luftfeuchtigkeits- und Temperatursensoren, see “Praktikumsreport Sascha Martini”

A.5.8 Data analysis (*center bottom*)

Allows defining all data analysis wanted. At first select the **main device** of the measurement which should be used for all the data analysis. Afterward it is possible to select the options. Available options are:

- **Fit linear** - Calculates the resistance automatically ²⁹
- **Negation** - Multiplies the voltage and the current of the main device with “-1” if the unit is “Ampere”. For “Farad” only the voltage is multiplied.
- **Correct for needles** - Divides the measurement values with the number of needles entered in the DB input.
- **Correct for neighbors** - Divides the measurement values with the number of neighbors entered in the DB input.
- **Exact readout** - Defines if the readout by a voltage should be exact or if the values from the next higher voltage should be used, if a voltage is not a measurement voltage step.³⁰
- **Readout voltage** - Readout the values of the main device for the set voltages in the field “Voltages for Readout”. With the option “Readout unit” it can be selected if the unit of the entered value is voltage or the field in $v/\mu m$. For the option field the field is calculated with the “sensor thickness”. For MPix-Sensors this is done automatically. With the option “Volt+Field” the voltages have to be entered and the field strength is calculated.
- **C_{int} Normer** - Corrects C_{int} for the geometry of the sensors ^{31 32 33}.
- **C_{Back} Normer** - Corrects C_{back} by the geometry of pixels and calculate the theoretical values ^{31 32 33}
- **Norm R to Pitch** - Scale for MPIX sensors the inter pixel resistance to the pitch. Result is in Ohm per micro meter.
- **Calc V_{Depl}** - Calculates the depletion voltage if the main device is a LCR meter, chapter 4.2.2. If the structure is a MPix-Sensor the effective charge carrier concentration N_{eff} is calculated, too. **Warning: This works reliable only, if “nice curves” are measured.**

²⁹Only possible for devices with the unit “Ampere”

³⁰E.g. If measuring the two points (5 V, Value1) and (10 V, Value2) and are trying to readout the exact value at 6 V then an error message will be produced. Elsewise the result is: ValueAt6V:Value2

³¹after E. Barberis et al. Nucl. Instr. and Meth. A342 (1994) 90

³²With the option “readout normalized values?” it can be decided if normalized values should be readout, too.

³³Just for MPix-Sensors automatically

- **Spike finder** - Corrects automatically for spikes. The condition is $Value(i-1)/Value(i) \leq 1/2$ and $Value(i+1)/Value(i) \leq 1/2$. In this case the average of Value(i-1) and Value(i+1) is taken for Value(i).
- **Break down I?** - Determines the break down voltage. This voltage is defined by the slope of the curve. The condition is either $\frac{(I_{last}-I_{current})}{current} > 10\%$ or the current is higher than the limit entered in the field "break down current" definition.³⁴
- **Norm R to Temp** - Normalized the measured Resistance to the reference Temperature. For this the set temperature, the input field "Temperature to norm current" and the thermal coefficient "Alpha R" is used.
- **Norm Current** - Normalizes the measured current from the used temperature³⁵ to the reference temperature, set in the field "Temperature to norm Current".²⁹
- **Calc R_{Diff}** - Calculates the differential resistance for each voltage step.
- **Subtract first** - Subtracts from all measurement values the first value.
- **Calc V_{PT}** - Calculates the Punch-Through-voltage, chapter 4.2.7
- **Calc 1/C2** - Calculates one over capacitance square if a LCR meter is used
- **Calc V_{Jump}** - Search jumps into the curve. The condition is that the relative change for one voltage step is a factor two larger than the average of change of the three steps before and after
- **Norm to Efield** - Calculates the electric field in volt per micro meter sensor thickness and add it as additional column in the data set. The thickness is taken for MPix sensors from the sensor name if the input in the field "SensorThick" is not 9999. Elsewhere this value is taken. The result is in volt per micro meter.
- **Delta Value** - Calculates for the voltages enter in the field "Voltages for Readout" the absolute change of the measured value in the voltage range entered in the field "Delta[V]"
- **Norm R To Length** - Scale for MPix sensors the bias resistance to the specific resistance in ohm per centimeter³³
- **NormToArea** - Divide the measured value with the area of a MPix sensor region or the pixel area³⁶. The result is per square centimeter³³

³⁴The measurement not stops if this limit is reached! This is just true for the safety option, page A.5.6

³⁵Taken from DB input / Probe station readout

³⁶Pitch x Length

- **NormToVolume** - Divide the measured value with the volume of a MPix Region or the pixel volume³⁷. The result is per cubic centimeter³³
- **SmoothData** - Use a Savitzky-Golay filter of third order to smooth data
- **PeakFinder** - Smooted data are searched for peak voltage. The next three neighbors are taken into account.

The option “Clear ’V for readout” reset the input field “voltages for readout” and the option “Clear data analysis” reset all entries for the data analysis.

A.5.9 Other Fields (*right side*)

All other fields on this side are internal variables and settings. Shown are:

- Version of the program
- The total of the measurement time
- Very expert settings like³⁸
 - The IP address of the probe station control computer
 - Port of the ProberBench Software interface
 - Login data to the database
 - The settings of the safety factor for the dew point sensors
 - An internal string to separate information into the setting files
 - Define special characters that must not be in the file name, the input must given in that form: “[*input*]”. For more sophisticated input you have to read in the Labview help about “match regular expressions”
- A list of internal variables for intermediate results. **DON’T Touch!**
- A list of ideas for improvement³⁸
- The editorial

³⁷Pitch x Length x Thickness

³⁸If changes are wanted: See chapter A.1.2

A.6 Comments for Programmer

In this chapter some comments for further developments are given.

A.6.1 Requirements to use this Program

Necessities to run this program are:

- Everything is setup for a XP (or later) Windows system.³⁹
- Labview 10.0 or later with the database connection tools
- The “Sensirion EKH4 user lib”⁴⁰
- Connection to the internet
- Installation and setup of the Microsoft ODBC tool
- AFS token for the cmsdaq Account. That can be created e.g. with the openAFS tool from DESY net install programs.

A.6.2 Overview of the Internal Code Structure

The code has two main parts. On the left side, the parameter initialization is done. These are the “Input test”-SubVI and the save and load functionality of the settings. On the right side, the measurement sequence is positioned.

In the first part the setup of the devices, sources, sensors and the probe station happens. Also the header is generated partially. On the second sequence part, the read out of the time stamp of CERN time happens. In the third part, the measurement itself is done.

Here are convoluted while loops over all passes, temperatures, positions, measurements types, frequencies, regions, and voltage steps. All of these while loops consist of a sequence with 2 parts. The first part is for the initialization, header and status field writing. The second part is the loop operation itself. The saving of the data happens in two places in the data flow. For each single measurement (temperature, position, measurement type, frequency) a separate measurement file is created in the SubVI “Save Data”. Placed there is also the data analysis and the saving file of “All measurement data” file is placed. Into the “Save Data”-SubVI also inputs for arrays that contain information about the file paths and the main device data for the collection file are generated.

The second place of data saving is in last part of the main sequence. There the collection data file and the final protocol file are saved. Also all files are transferred to the database and all devices and sources are settled back.

³⁹A usage on Linux systems is possible but require changes of the file paths in the source setup files and the file paths of the SubVIs. Also a Linux equivalent to the Microsoft ODBC tools is needed, too.

⁴⁰It has to be copied to the user lib-folder of Labview. A compressed copy can be found in the main folder of MeasureSoft.

A.6.3 List of Sub-Vi

All SubVI's are available in the subfolder '/Sub-VI' of the main program folder or in the shared folder \Labview programs\Matthias\SharedLibs where all SubVIs saved that are also used for the "DataReader"- or "DataAnalyzier"-Software.

In general it is possible to change the SubVIs without disturbing the functionality of the main program, **but for the setting saving SubVIs this is not true. If wanting to change the code, make a backup copy of the entire program before!**

For the functionality of each SubVI see the following lists. If wanting to know more about the implementation, look into the code or ask the programmer. The SubVI's are organized like:

SubVIs

All general SubVIs are placed in this category.

- **Average.vi** - Builds the average of values inside an array.
- **BMSforConstVolt.vi** - Basic measurement step for one voltage and readout all activated devices.
- **InputTest MS.vi** - Tests the user input for input errors.
- **PlotAllData.vi** - Makes the plotting and visualization of the data. ⁴¹
- **ReadTimeStamp.vi** - Reads the official CERN time stamp from the web page <http://cern.ch/timestamp>.
- **Region-line-pitch-Reader.vi** - Generates from the MPix-structure name the region, line and pixel number and the pitch

Sub-VIs/Database

Everything related to the database is stored.

- **DBread.vi** - Reads the database and shows an array with all data.
- **DBwrite.vi** - Writes information into DB tables.
- **Save in Database.vi** - Shift files to the DB folder 'afs/afh.de/www/doc/cms/doc/Y/M/D'. For doing this valid AFS token is needed.

⁴¹Only for MPix sensors

Sub-VIs/Datasave

Everything related to data saving and data analysis is stored, see for more information chapter A.5.8. DataSave MS.vi - is the main SubVI to save the measurement data. Also all data analysis is done here. For that VI all of the following SubVi are needed:

- **BreakThroughCurrent.vi** - Determine the break through voltage and the current at this voltage
- **CBack-Normer.vi** - Normalizes the capacitance to back side and calculate the theoretical values⁴¹
- **Cint-Normer.vi** - Normalizes the capacitance between pixels⁴¹
- **DepletionVoltage.vi** - Calculates the depletion voltage. For that are taken the first ten and the last 5 measurement values. For all of this values $1/C^2$ is calculated and a linear regression for the both regions is done. After that the point of intersection is calculated.
- **FitLinear.vi** - Calculates the resistance
- **Readout at voltage.vi** - Readout the values for the entered voltages
- **Save AllData.vi** - Save all values of all devices and all voltages in a file with add to the name: "—AllData.txt".
- **SpikeFinder.vi** - Finds and corrects spikes
- **VPTcalce.vi** - Calculates the Punch-Through-voltage
- **CreateCommonHeader MS.vi** - Creates the database header

Sub-VIs/device source and matrix list

All SubVI's which manipulate the device, source and matrix settings, are available in this list. Also included are the text files with the settings and there backup files. The SubVI which changes the frequency of the LCR meters has the name "Change LCR.vi".

Sub-VIs/Parameter saving

Four SubVi's to load and save the setting file are placed. This SubVI's are also used to create parts of the protocol file and the database header. *Be careful if making changes at this point!*

Sub-VIs/Probe station

Everything related to the probe station is stored. In general, all commands have the same structure. They send the instruction order from the manual and give it an individual command number. Then analyze the incoming strings from the probe station, as long as getting responses from the command number.

- **SET Prober XY.vi** - Generates the positions you like to go to, chapter A.3.7
- **INI ProbeStation.vi** - Makes the initialization of the probe station
 - Register MeasureSoft at the ProberBench interface
 - Read chuck status
 - Set home position
- **Move Chuck.vi** - Moves the chuck in X and Y- direction.⁴²
- **Read Temperature.vi** - Reads the current temperature from the chuck
- **Set Temperature.vi** - Sets the temperature of the chuck
- **Change Positions with Temp.vi** - Correct the positions for the new temperature⁴³
- **Close ProbeStation.vi** - Closes the connection to the probe station after the measurement
- **INI HumSen.vi** - Initializes the dew point sensors
- **TempHumiDew.vi** - Shows data from the dew point sensors
- **INI SwitchMatrix.vi** - Initializes the switching matrix⁴³
- **SwitchMatrix.vi** - Changes the switching matrix during a measurement⁴³

Sub-VIs/source SubVI

For each source a control VI and a setup VI is needed. For new sources these SubVIs have to be programmed and it is necessary to do an entry in the source list. The setup SubVi has to have a field “ADDRESS”⁴⁴. The control SubVI additional to that an input field “VOLTAGE”. In that folder also the SubVI “NewVoltage.vi”, that calls the control SubVIs of the sources and send them the new voltage, is inside.

⁴²Thereby the chuck goes in separation high and moves to the new position. The new position is checked and corrected as long it is not into the accuracy range of two micro meter. Afterwards the chuck goes back to the contact high.

⁴³Implemented but not running currently

⁴⁴All letters capital!

A.7 Remarks

A.7.1 Final Comments

MeasureSoft has a long history. The development of the first software parts started in the year 2005. Today, MeasureSoft is in a finalized status and the basic options should be run without any bug.

If someone likes to change, add or improve something, please feel free to do so. Keep in mind that this Software is very complex and a lot of cross interactions from different source code parts exist. Therefore be careful and check everything twice, before overwrite old codes!

A.7.2 List of Know Errors or Bugs

Currently nothing is known.

A.7.3 List of changes start form 2.16

1. V2.17

- (a) Select in data analysis if the voltage readout should be in volt, electric field or both
- (b) Implement CtotNormer in CbackNormer
- (c) New Input test for special characters in structure name
- (d) New file option to remove special characters from file name

A.7.4 Acknowledgment

Thanks to all users which gave during the last years a lot of input, how the perfect software for our measurements has to look like and what functionality are mandatory. *I hope, I could implement and thereby fulfill all of them.*

Special thanks to **Sascha Martin** and **Martin Stegler** who contribute some of the SubVIs mentioned above.

Appendix B

Handbuch der Datenanalysesoftware

Manual

for the DESY Zeuthen software

DataAnalyzer

Manual Version : 1.00

Related Program Version : 1.04-23.10.2013

Matthias.bergholz@desy.de

+49 33762 7-7656

B.1 Introduction

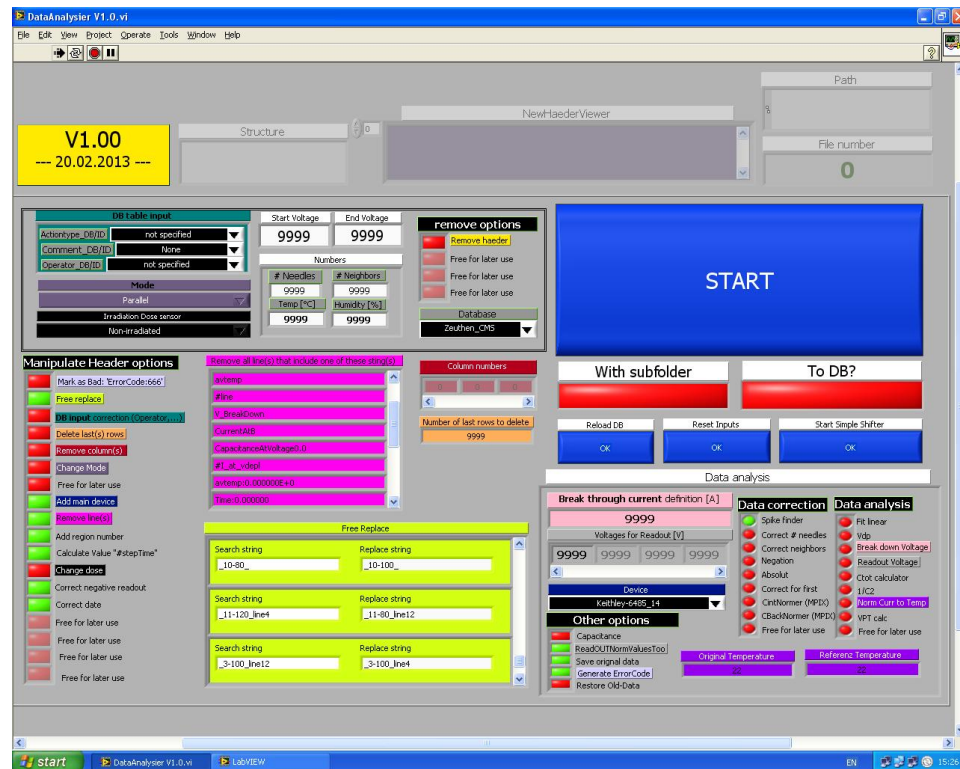


Figure B.1: User interface of the DataAnalyzer Software

This manual deals with the data analyzing software “DataAnalyzer”. DataAnalyzer enables the creation and manipulation of the database input headers for measurement files for the Zeuthen databases. The basic functionality of this software are:

- Create input headers
- Change old headers
- Perform data analysis

You can see the user interface of this software in figure B.1.

B.1.1 General Remarks

The design of this software is coherent with the design for the Software “Measure-Soft”, chapter A. This means for example that a ‘9999’ entry is ignored and blue buttons with white letters are functions. All colored name fields of the inputs are connected to the related input fields.

The Analysis start with the button “Start”. Immediately a dialog-box opens and the file to analyze has to be selected. **Be aware of the fact that all files in the selected folder are processed in alphabetical order!** Optionally, the usage of files into contained subfolders can be selected. An additional option is to select that files should be changed directly into the database, too. **Take into account that by choosing this option, OLD entries will be overwritten!**

Other available options, without analyzing functions are:

- Reload database information
- Reset inputs
- Start a simple file shifter, meant that files in the chosen folder are written into the database without changes.

Data file rules

This software assumes that the given input is a text file¹. This includes files with or not without an old header and a “tab” separated data field². See below, how a file should look like, page 176.

The other format rules for the header are:

- Lines beginning with a “%” are ignored for the database export.
- Lines beginning with a “#” are not imported into the local database but can be exported into the main database in Lyon.
- The other lines have the format “parameter_name” “:”³ “value”
- Separator line between the database header and the measurement data array must start with: “voltage ‘tab’ time ...”

¹’.txt’; ’.dat’ or ’.rtf’ files are possible

²If you have other separators: Try to read it, too. If this is not working read the files with Origin or Excel and export them with the correct format

³Don’t use this separator else wise!

example file

```

%%%Header
Entry1:Value1
Entry2:Value2
...
Voltage Time Device1 Device2
voltage1 time1 value1D1 value1D2
voltage2 time2 value2D1 value2D2
...

```

Trouble Shooting

In case of occurring errors, be aware of

- For using the database, a valid AFS-Token for the CMSDAQ account is needed.
- All used structure names inside header of the files have to be in the database.
- The selected device name for the data analysis need to have its one data column inside!
- Files need to have the correct format mentioned above.

B.2 Create Headers

For old measurement files no usable inputs for the database exists. However, the DataAnalyzer Software allows the creation of it. An input into the database has to have the following information:

- Structure name
- Actiontype name
- Standard pre-defined comment
- Operator name

Be aware of the fact that by working with more than one file, all structure names can change. Therefore use the button “More than one Structure”. An additional user dialog-box will appear, already known from MeasureSoft, used therefor positioning, chapter A.3.7. Use it in the same way, to create a structure name list⁴. The other input fields are the same as in the “MeasureSoft”-Software.

- Selection of the storage destination (CMS/FCAL or ATLAS database)
- A comment field for entering non pre-define comments.⁵

⁴Positions are certainly ignored for this use

⁵The usage of “enter” inside this field is not allowed!

- The number of needles necessary for the measurement.⁶
- The number of neighbors of the central element measuring to.
- The temperature at which the measurement is done. If using the probe station, an additional data column with all extracted temperatures is added to the data file.
- The humidity if not read out from sensors.
- The irradiation dose.

All these inputs are available at the top left side. These inputs are automatically used if the default values are changed and ignored else wise. If you change the inputs and the already exist into the files, they are updated.

B.3 Change Header

When using older files, some of the inputs are not set according the current format. By using the tools at the bottom left side they can be changed⁷. The following options exist:

- **Mark a measurement as bad** - The Error Code is set to “666”.
- **Replace strings** - In the yellow input field, strings can be defined that should be replaced. Therefore are the input fields “search string” and “replace string”. Some entries are pre-defined to correct old invalid inputs. **These pre-defined inputs shouldn’t be changed.**
- **Modify database input** - Change the basic database inputs like operator or structure name. **Else wise these fields are ignored!**
- **Delete last rows** - Some old files have empty data rows at the end of the file. With this option they can be deleted. Enter in the orange field the number of rows that should be deleted, counted from the file end.
- **Remove columns** - Here you can remove columns in the data array. Enter in the dark red field the column numbers⁸.
- **Change mode** - Changes the mode of capacitance measurements.
- **Add BigBrowser Input** - Set the Tool_ID and the connection of the guard ring

⁶The Wedgecard needles are not included thereby!

⁷Always updated without prompt if old entries exists!

⁸Counting begins with one. Numbers do not change if you delete columns before. *So if you want delete the fourth and sixth column don’t enter 4 and 5!*

- **Add main device**⁹ - Takes the device name of the device selected into the analysis field.
- **Remove lines** - Remove lines from the header. Enter the first strings of the column in the magenta input field. Some entries are predefined for the deletion of old and invalid entries. **These pre-defined inputs shouldn't be changed.**
- **Adds region number** - Add the region, line and pixel number for MPix sensors. **Not useable for other structures!**
- **Add step time** - Calculates the average step time for the measurement.
- **Change dose** - Changes the irradiation dose entry of the sensor. **If not applicable this field is ignored!**
- **Correct negative readout** - If you negate the measurement data, see page 179, and had readout values before, this entries are not negate automatically. This option correct this. That mean "ValueAt-XV:-Y" is change to "ValueAtXV:Y"
- **Correct date** - The current date format is Year/Month/Day clock time. Old entries which could be different get harmonized with this function.
- **Add free header entry** - Enter a string in the light blue field which is append to the existing header ¹⁰.
- **Add Voltages** - The start and end voltage of the measurement is added to the header

Remove options

- **Header remove** - Deletes the database input. The result is a file with containing the data array.
- **Change the Error Code '666'** - As default it is not possible to change the "Error Code" number '666'. With activation it will be change with the new error code, if the error code generation option is used.

B.4 Data Analysis

The options for data analysis are at the buttons on the right side. The analysis options are the same as these of the MeasureSoft. They are defined for the column of the main device. For keeping the old data, this option should be activated. Options for correcting the data are:

⁹Means the entry into the file. This is crucial for some database functions

¹⁰This can be used for adding a default date in old files "StartDate:1111\11\11" 11:11

- **Spike finder** - Corrects spikes automatically. The condition is $Value(i-1)/Value(i) \leq 1/2$ and $Value(i+1)/Value(i) \leq 1/2$. Thus the average of $Value(i-1)$ and $Value(i+1)$ define $Value(i)$.
- **Correct needles** - Divides the measurement values with the number of needles entered in the database input.
- **Correct neighbors** - Divides the measurement values with the number of neighbors entered in the database input.
- **Negation** - Multiplies the voltage and the current of the main device with “-1”¹¹
- **Absolute** - Calculates the absolute value for the voltage column and the column of the main device
- **Correct for first** - Reduce all measurement values by the first value.¹²
- **C_{int} -Normer** - Corrects inter pixel capacitance C_{int} by the geometry of MPix and strip sensors.
- **C_{Back} -Normer** - Corrects capacitance by the geometry of MPix and strip sensors.
- **Remove Doubles** - Corrects double measured voltages coming from a bug in early versions of MeasureSoft.
- **SmoothData** - Use a Savitzky-Golay filter of third order to smooth data
- **Norm to StartValue** - Divide all data with first value *Not working in combination with the option “Correct for first” or if the first value is Zero*
- **Norm to EndValue** - Divide all data with last value *Not working if last value is Zero*
- **Subtract Maximum** - Subtract the maximum value from all values
- **Subtract Minimum** - Subtract the minimum value from all values

Options for analyzing the data are:

- **Fit linear** - Calculates the resistance. In the field “Infinity Limit” a maximum resistance can be set. If the calculated result is higher than the limit¹³, the entered value is taken as result.

¹¹This is only be done if the unit of the main device is “Ampere”

¹²Used as offset correction

¹³e.g. 100 TΩ for Keithley 6485 or 6487

- **Calc V_{Depl}** - Calculates the depletion voltage V_{Depl} with a one over $1/C^2$ plot method. If the structure is a MPix-Sensor the effective charge carrier concentration N_{eff} is calculate, too. **Warning: It works stable and reliable only if “nice curves” are given.**
- **Break down Voltage?** - Determines the break through voltage I_{Break} . The break through voltage is defined by the slope of the curve. The condition is either $\frac{(I_{last}-I_{current})}{current} > 10\%$ or that the current is higher than the limit entered in the field “break down current” definition.
- **Readout voltage** - Read out the measurement values of the main device for the preset voltages in the field “Voltages for Readout”
- **NormToVol** Divide the readout values with the volume of a MPix sensor region or with the volume of a pixel.¹⁴ The result is per cubic centimeter.¹⁵
- **Calc $1/C^2$** - Calculates the value of one over capacitance square and write them into the data array.¹⁶
- **Norm Cur to Temp** - Normalizes the current to the reference temperature. The values are taken from the violet input fields “Original Temp” and “Reference Temp”.
- **Calc R_{Diff}** - Calculates the differential resistance R_{Diff} for each voltage step.
- **Scale R with Temp** - Normalizes the poly silicon resistor value to the reference temperature. The values are taken from the violet input fields “Original Temp” and “Reference Temp”.
- **Calc V_{PT}** - Calculates the Punch-Through-Voltage V_{PT} .
- **Calc Jump Voltage** - Check if in the curve are jumps and write the jump voltage V_{Jump} . The condition for a jump is, that the value increase a factor 5 more than the 3 points before and after.
- **Scale to Field** - Add an additional column to the data array that includes the electrical field in Volt per micro meter sensor thickness.¹⁵
- **Calculate Delta** - Calculated value change into the voltage range given in the field “Delta [V]” around the values enter in the the field “Voltages for Readout”.
- **Norm R to Pitch** - Divide the interpixel resistance R_{int} with the pitch. The result is in ohm per micro meter.¹⁵

¹⁴Pitch x Length x Thickness

¹⁵ONLY possible for MPix Sensors.

¹⁶This is only possible for devices with the unit “farad”

- **Norm R to Length** - Divide the poly silicon resistance R_{Poly} with the length of it. The result is in ohm per micro meter.¹⁵
- **NormToArea** - Divide the readout values with the area of a MPix sensor region or with the pixel area.¹⁷ The result is per square centimeter.¹⁵
- **RPTWorkPoint** - Readout the resistance from a punch-through-transistor at the working point for a field of $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$.
- **PeakFinder** - Smooted data are searched for peak voltages V_{Peak} . The next three neighbor points are taken into account.

Other options are:

- **Capacitance** - Defines that the unit of the main device is “Farad”.
- **Read norm values** - Calculated normalized values are read out, too.
- **Save Original Data** - Creates an additional column with the original data of the main device. **This option is mandatory if the original data are changed.**
- **Generate ErrorCode** - Creates or change the generated Error Code, table A.1.
- **Restore Old-Data** - Replaces the current entries from the main device by the values in the column Org-Data-Main.

¹⁷Pitch x Length

Appendix C

Handbuch der Datenauslesesoftware

Manual

for the DESY Zeuthen software

DataReader

Manual Version : 1.00

Related Program Version : 1.03-17.09.2013

matthias.bergholz@desy.de

+49 33762 7-7656

C.1 Introduction

This manual deals with the software “DataReader”. DataReader allows to extract measurement results from the database “CecDB”, chapter D.

The main task of this program is the generation of SQL-queries. The user interface of this software is shown in figure C.1.

C.1.1 Program Flow

By starting the program, a connection to the database is established and all program tables are updated.¹ After the selection of the readout filters, chapter C.2, the button “Start” will begin the database readout. At first a list of all structures is created, taken the inputs from the left side of the program. The related SQL-Query is mentioned in the field “Search query for structures”.

After that a list of measurements is generated, selected by the structure name, action type name and the additional constraints “Search query for measurements”.

¹ With the button “Load DB” all information will be reloaded. With the button “Reset” all entries will be reset to the default one.

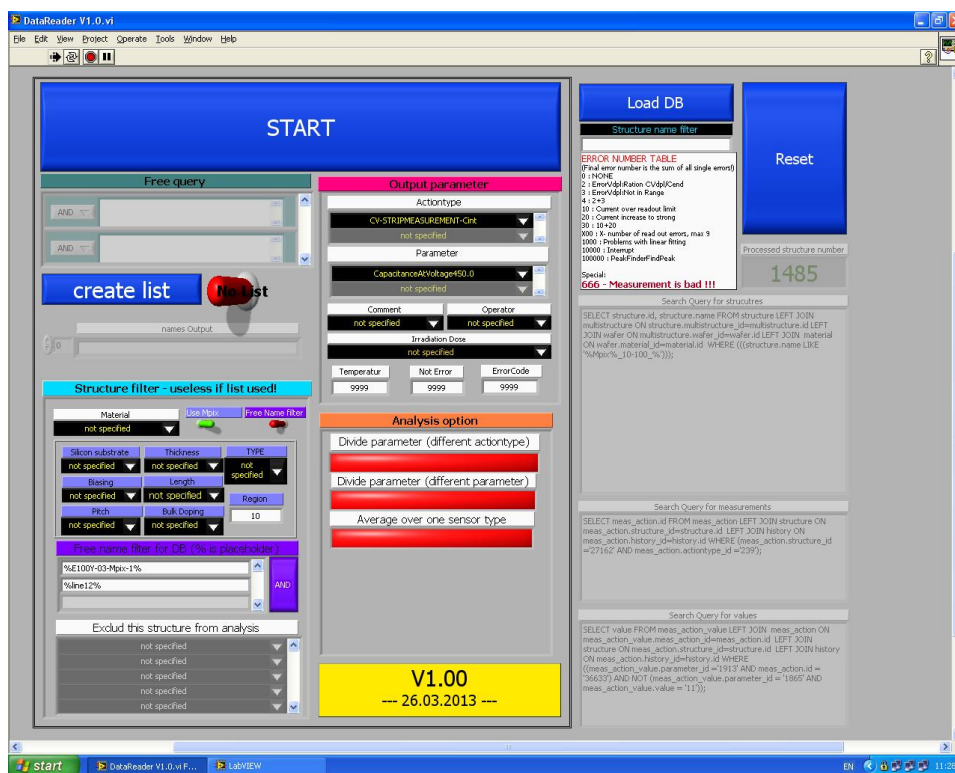


Figure C.1: User interface of the DataReader Software

At last for this list the value for the selected parameter is read out, “Search query for values”, and written into a four dimensional array. The indices of this array are the parameter_number, the action type_number, the structure_number and the value_number. From this array all outputs are generated.

Output files During the database request a dialog-box opens and a file name has to be named. This file is a standard text file with the appendix “—RawData.txt”. In this file all results are written in a four column format:

```
“struture name1” “value1” “parameter name1” “action type name1”
“struture name1” “value2” “parameter name2” “action type name1”
“struture name1” “value3” “parameter name1” “action type name2”
“struture name1” “value4” “parameter name2” “action type name2”
“struture name2” “value5” “parameter name1” “action type name1”
...
```

The program generates additional files for each action type and parameter combination named with: “...__parameter name__action type name.txt”. Into that file the results are sorted by structure groups for one sensor²:

```
“group name1” “region number” “value1” ... “valueN” “Mean” “Standard Derivation”
“Minimum value” “Maximum value”
“group name2” “region number” “value1” ... “valueN” “Mean” “Standard Derivation”
“Minimum value” “Maximum value”
...
```

On the end of these files the unsorted result list is added.

```
Unsorted
“structure name1” “value1”
“structure name2” “value2”
...
```

If one of the analysis option is selected an extra file including the analysis results is generated. The name of this file is “—Analysis.txt”. If the “Free query option” is used the results are saved in a file named “—FreeQuery.txt”.

²That mean that the structure names for MPix sensors are cut by the “line”-string and the results for each sensor type are taken for each sensor region. For example you have three structures M200P-07-MPix-2_1-120_line4_pixel0002 M200P-07-MPix-2_1-120_line4_pixel0004 M200P-07-MPix-2_1-120_line4_pixel0004 than there results for all of this three pixel will be merged to the group M200P-07-MPix-2_1-120

C.2 Selection options

The database input can be filtered for the readout. The available filter options are:

1. Enter a free SQL query. Optionally it is possible to enter more than one query and combine them by an “and” or an “or” condition.
2. Using the pre-define structure name filters
3. Select the parameters and action types. It is possible to enter more than one entry of both. In that case all combinations are requested.
4. Enter the operator name and choose a pre-defined comment.
5. Make additional constraints to the measurements
 - (a) Select a temperature
 - (b) Choose an irradiation dose
 - (c) Pick up an error code
 - (d) Excluded an error code
 - (e) Set the number of used needles
 - (f) Set the number of used neighbors

Please note that the entries “not specified” and “9999” are ignored.

Structure selection It is possible to select structures. The first option is to create a list of structure names. To use this option, the button “create list” have to be pressed and the tool known from MeasureSoft is started, chapter A.3.7³. **All other structure selections are ignored if a list used!**

The second option is to use the structure filter. There are input fields for the material like “diamond”, special filters for MPix sensors and a free name filter. The special selection options for MPix sensors are:

1. **Silicon substrate** - Float Zone, Epitaxial or Magnetic Czochralski
2. **Bias resistor** - Poly silicon or Punch-Through-Structure
3. **Pitch** - 80, 100 or 120 μm
4. **Thickness** - 50, 100, 120, 200 or 320 μm
5. **Pixel length** - 1171 or 2241 μm
6. **Bulk doping** - p- or n-type
7. **Technology** - p-Spray or p-Stop
8. **Region number**

³Position information are of course ignored

All of these options are “And”-connected, that meant that the result of a combination is the strongest constraint! This selection have to be activated with the button “Use MPix”, else wise the inputs will be ignored.

With the “free name filter” strings that have to be inside the structure name can be define. This selection is case sensitive and the percent sign is a place holder. It is possible to enter more than one constraint and combine them with an “and” or an “or” condition.

With the last input field it is possible to exclude some structures from analysis by selecting them.

C.3 Readout options

In addition to the data selection some analysis can be done. These options are:

- **Divide one parameter for different action types**

For example, readout the current at 450 V for the action types “IV-Pixel” and “IV-Biasring”. Than this both values are divide with the first value for all structures individual.

- **Divide parameters for one action type**

For example, readout the current for the action type “IV-Pixel” at 100 V and 450 V. Than this both values are divide with the first value for all structures individual.

- **Average over one sensor type**⁴

This means a list with all results from one sensor type is created. Like all MPix sensors on float zone silicon with a thickness of 320 µm and produced with p-Stop technology. This list is sorted by the regions of a sensor type

- **Exclude this limits in statistic**

Values higher or lower than the “Minimum” or “Maximum” are ignored for the calculation of the mean value, but still written in the output column minimum and maximum.

⁴MPix sensor name style required

Appendix D

Manual Data Base

To save all measurement data and to have a tool for data analysis a MySQL-Data base [7] was created and a HTML based user interface was produced. This database is called “**CecDB**” and can be reached for users under the link:

www-zeuthen.desy.de/cecdb/login.

For creation of the user interface the Perl [150] based Framework “Catalyst” was used, chapter D.1.2. The user interface and all related functions was mostly created by Lukas Thiemeier and Wolfgang Friebe. In the following chapter the basic ideas of the software and the table structure of the database are described.

D.1 databases

Databases are build of linked tables where the columns have a precise convention about the data format and the included information. A data entry is a line into these tables.

Fast and efficient databases are generated with **coupling tables** where information of different tables are combined.

For example the table “parameter_meas_actiontype”, page 194, includes the information about the measurement type and the related parameters. So it is possible to request for one measurement type the related parameters in a very fast way.

D.1.1 Short introduction of MYSQL

MYSQL is a “Open Source” database management system [93]. MYSQL use the Structured Query Language (SQL) and has for the data management the “InnoDB storage engine” [93], which control all interactions. The data of each table are saved in 16kByte packages in a special tree format. Each tree has an index over which the access is handled. One example of a SQL-query is:

```
SELECT * FROM history WHERE date = '2012-07-04';
```

which request all data from the table “history” created on the forth july in the year 2012.

D.1.2 Short introduction off the Catalyst-Framework

The Catalyst-Framework [45] is the Perl equivalent to the “Ruby on Rails” concept and follows a “Model View Controller” (MVC)-conception.

Model

The Model allows the access to the data. With an existing database model all data are saved in a data hash from which the data can be handled. For example the database model for the CecDB table “meas_action” looks like D.1

```
Table __PACKAGE__->add_columns(
  uploaddate, % Upload date
  {data_type => timestamp, datetime_undef_if_invalid => 1,
  default_value => current_timestamp, is_nullable => 0},
  datalocation,
  { data_type => varchar, is_nullable => 0, size => 511}, % Variable definition
  md5,...,
  {data_type => varchar, is_nullable => 0, size => 33}, % Variable definition
  ...
```

```
boundary conditions __PACKAGE__->set_primary_key(id);
% Definition of the identifier
__PACKAGE__->add_unique_constraint(meas_action_md5, [md5]);
% Unique constrain
```

```
Hierarchy __PACKAGE__->belongs_to(actiontype,
% Refers to the table “actiontype”
  {id => actiontype_id}, % Definition of the reference
  {is_deferrable => 1, join_type => LEFT, % Left handed reference
  on_delete => CASCADE, ... }); % Hierarchical delete
__PACKAGE__->has_many(meas_action_values, ...);
% Is referenced by table “meas_action_type”
```

View

The data output is done with the “Template Toolkit”. With that it is possible to combine HTML and Perl commands. With the construction “[% %]” data from the hash can be include. For the graphical formatting “Cascading Style Sheets” are used [127].

For example the code below generates the head of the main page, figure D.1

APPENDIX D. MANUAL DATA BASE

```
<span style="font-family:Arial;font-size: 25pt; color: #8B0000">% HTML
<a href="[% base %] history">History</a> </span>
% Link to table "history"
|<a href="[% base %]">Home</a> | <a href="[% base %]restricted">Restricted
Area </a> | <a href="[% base %]logout">Logout</a> |
...
% Links to the main and administrator page and the "logout"-function
<span style="font-family:Arial;font-size:20pt;color:#191970">Measurements</span>
<span style="font-family:Arial;font-size:20pt;color:#191970">Modifications</span>
...
% Column names
<a href="[% base %]measaction">Measurement</a>
<a href="[% base %]modaction"> Modification</a>
...
% Table links
<a href="[% base %]measactionvalue"> Measurement values</a>
<a href="[% base %]modactionvalue"> Modification values</a>
```

For each subpage a separate template was created and the chosen functions implemented. The presentation of data from the hash is demonstrate for the table “history”:

```
<center><h2> History </h2></center>
<form action=[% c.uri_for_action('/history/multiaction','0') %] method="post">
<table>
% HTML-Code
<th> [% order_by_column_link('id', 'Id') %] </th>
<th> [% order_by_column_link('date', 'Date') %] </th>
...
% Implementation of the sorting functions
[% FOR row = result.all %] % Read the data from the hash
[% row.id %] % Stepwise representing of the column "ID"
[% row.date.ymd %] % Stepwise representing the column "Date"
...
<a href="[% c.uri_for_action('person/view') %]/[% row.person_id %]"
>[% row.person.name %]</a>
% Read information from the linked table "person"
...
[% END %] </table></form> [% PROCESS pager.tt %]
% Call template for data sorting
```

Controller

The controller handle all actions and check the inputs. This happens by Catalyst with generation of HTTP-addresses. These addresses call on the server the corresponding orders. For example

<https://www-zeuthen.desy.de/cecdb/history/edit/31255>

calls for the table “history” the editing for the entry ID “31255”. Change in the link the string “edit” to “view” results to start the view function.

D.1.3 User interface

Top area In the top area, figure D.1, is the for all pages identical header with the link to the table “history”, the start and the administrator page and the “Logout”-function. Additional for every action type ¹ the entry and the definition table can be open.

Middle area In middle the list of all entries for a table is shown. Above each table new entries can be added. For each entry th following options exist:

- **View** - Shows all linked information
- **Edit** - Allows to edit the entry if meaningful²
- **Delete** - Allows to delete entries
- **Export** - Special option for measurements which call the file export

Bottom area Under the table there is the view selection and a search field. In the **search field** the shown entries can be filtered.

Each search entry has three columns. In the first one the search parameter is shown. In the second the search function can be selected and in the third the keyword is written. The following search functions can be selected

- **Ignore** - Ignore the input
- **Equal** - The entry have be exactly the same
- **Greater (>) or smaller (<)** - The entry have to be greater (smaller) or equal. Work for numbers and strings
- **Like** - The entry sting have to have similarly pattern. The “percent sign” is the place holder

Under the search field the list of definition tables for the structures, the user and the action types are shown. Depending from the user rights this part can be hidden.

¹measurement, shipping, modification and simulation

²not for measurement data

Zeuthen Measurement Data Base



| **History** |
| Home | Restricted Area | Logout |

Measurements	Modifications	Simulations	Shipments	Free actions
Measurement	Modification	Simulation	Shipment	Free action
Measurement values	Modification values	Simulation values	Shipment values	Free action values

History

Id	Date	Person	Annotation			delete
31512	2013-01-27	Bergholz	None	View	Edit	<input type="checkbox"/>
31513	2013-01-27	Bergholz	None	View	Edit	<input type="checkbox"/>

Search in History

parameter	operator	value
annotation	ignore	Biased
date	ignore	
Actiontype	ignore	CV-STRIPMEASUREMENT-Cint
person	=	Bergholz
structure name	ignore	

search

Structure management	Person management	Definitions
Wafer	Center	MeasActiontype
Material	Place	ModActiontype
Wafertype	Person	Parameter
Technology	Role	Annotation
Structure		Carrier
Structure Groups		
StructureType		
StructureGroupType		
Status		

Figure D.1: Web interface of the CecDB database

D.2 Description of the database tables

Due to the reason that the CecDB is a research and development database it was not clear which information should be stored. So the database was designed as meta database where not the measurement data it self are stored but all related information. The measurement results still saved in the measurement files and just the file path is stored into the database.

To avoid later changes in case of unforeseen requirements a flexible table structure was chosen. For every information type a definition table was build and the information for each measurement are combined over coupling tables.

For example there are the list of measurements “meas_actiontype”, the list of parameters “parameter” and the combination of these information in the table “parameter_meas_actiontype”. An extension of a measurement with a new parameter is than a simple append of the parameter table and a new entry in the coupling table. With the same principle the the measurement values are stored. For each measurement the tables “meas_action” and “parameter” are combined in the table “meas_action_value” with the corresponding values.

A special feature of the CecDB is the recursive structure grouping in the table “Multistructure”. With that design it is possible to have the substructure³ of a (MPix)-Sensor mapped into the database.

The tables of the CecDB can be divided into five groups:

- Administration tables of users with the central table “**person**”
- Structure tables for sample description with the central table “**structure**”
- The “**History**” table for all past actions like measurements
- Information tables for all actions:
 - **meas_action** - Measurements
 - **mod_action** - Sample modification like irradiation
 - **ship_action** - Shipment of samples
 - **Sim_action** - Simulations for samples
- Value tables which combine action types and parameters (table “**parameter**”) in the coupling tables “parameter_’action group’_actiontype” and the value tables itself “ ‘action group’_action_value”

A full list of all table and there columns is given into the table D.1.

³Pixels, Pixel lines, Regions, Full sensor

Tables of the CecDB					
Group	Name	Type	Function	Columns	Format
Structures	Status	D	Sample status	ID	int
	Structuretype	D	Sample type	name	var
				ID	int
	Structure	C	List of samples	name	var
				object_ID ⁴	var
				structuretype_ID	int
				status_ID	int
				ID	int
				parent_ID ⁵	var
	Multiststructure	C	Recursive structure groups	name	var
				type_ID	var
				wafer_ID	var
				place_ID	var
					person_ID
See next side					

⁴ Identification in the CMS/Lyon database

⁵ Terms of structures with each other; NULL mean Main hierarchic. The ID identify the structure of the next lower structure level.

Tables of the CecDB						
Group	Name	Typ	Function	Columns		Format
Wafer	Material	D	Substrate material	ID		int
				name		var
	Technology	D	Production technology	ID		int
				name		var
	Wafertype	D	Substrat description	ID		int
				name		var
				ID		int
				name		var
				material_ID		int
				technology_ID		int
				wafertype_ID		int
				ID		int
				name		var
				unit		var
				required ⁶		var
				presel ⁷		var
Parameter	Parameter	C	Information type			
See next side						

⁶ Specifies whether the parameter is mandatory or not
⁷ Determines whether this is a measurement setting or a measurement parameter

Tables of the CecDB							
Group	Name	Typ	Function	Columns	Format		
Person	Center	D	Institute	ID	int		
				name	var		
				country	var		
				town	var		
				street	var		
				postcode	int		
				TestCenterID	int	int	
	Place	D	Location	ID	int	int	
				name	var	var	
	Role	D	Account status	center_ID	var	var	
				ID	int	int	
		Person	D	People management	name	var	var
					prename	var	var
					phone	var	var
					email	var	var
					accountname	var	var
					password	var	var
					created	time	time
					updated	time	time
					expirydate	time	time
					Center_ID	int	int
	Person_role	C	Account rights	person_ID	int	int	
				role_ID	int	int	
	See next side						

Tables of the CecDB						
Group	Name	Typ	Function	Columns	Format	
Simulation	sim_action	A	Simulationen	ID	int	
				structure_ID	int	
				uploaddate	time	
				model_dataallocation	var	
				result_dataallocation	var	
	sim_action_value	V	Simulation parameter values	model_md5	var	
				result_md5	var	
				history_ID	int	
				ID	int	
				sim_action_ID	int	
Modification	mod_action	A	Sample modifications	parameter_ID	int	
				value	float	
				ID	int	
				structure_ID	int	
				status_ID	int	
	mod_actiontype	D	Modification types	name	var	
				history_ID	int	
				actiontype_ID	var	
				ID	int	
				name	var	
parameter_mod_actiontype	C	parameter-linkage	url	var		
			mod_actiontype_ID	int		
			parameter_ID	int		
mod_action_value	V	Modification parameter values	ID	int		
			mod_action_ID	int		
				parameter_ID	int	
				value	float	
See next side						

APPENDIX D. MANUAL DATA BASE

Tables of the CecDB					
Group	Name	Typ	Function	Format	
Shipment	ship_action	A	Sample transportation	ID	int
				transportnumber	var
				datalocation	var
				multistucture_ID	int
				carrier_ID	int
				history_ID	var
	Carrier	D	Shipping company	ID	int
Measurement	ship_action_value	V	Shipping parameter values	name	var
				ID	int
				ship_action_ID	int
	meas_action	A	Measurements	parameter_ID	int
				value	float
				ID	int
				strucutre_ID	int
				uploaddate	time
				datalocation	var
				md5	var
				errorflag	tiny
				numcolumns	int
				columnheadings	var
				history_ID	int
				actiontype_ID	int
				ID	int
				name	var
				url	var
	parameter_meas_actiontype	C	Measurement parameter	meas_actiontype_ID	int
parameter_ID				int	
ID				int	
meas_action_ID				int	
parameter_ID				int	
meas_action_value	V	Measurement parameter values	value	float	
			End of table overview		

Table D.1: **Tables of the CecDB;**

The entry XXX_ID link to table Table XXX;

The table types are C = Coupling, D = Definitions, A = Action and V = Value table.

The value formats are var = varchar (String); int = integer; float = floating point; tiny = Boolean; time = data

Anhang E

Zusätzliche Tabellen und Abbildungen

ANHANG E. ZUSÄTZLICHE TABELLEN UND ABBILDUNGEN

	N_{Break}	Ratio	Test [V]	Mean [V]	Sigma [V]	Feld [V μm^{-1}]	Min [V]	Max [V]
E50Y	5(12)	0.42	300	305.0	11.2	6.1	300	325
E50P	11(12)	0.92	300	390.9	12.6	7.8	375	400
E50N	7(12)	0.58	300	346.4	9.4	6.9	325	350
E100Y	2(12)	0.17	500	450.0	70.7	4.5	400	500
E100P	1(12)	0.08	500	375.0	—	3.8	375	375
E100N	0(12)	0.00	500	—	—	—	—	—
FZ120Y	0(24)	0.00	700	—	—	—	—	—
FZ120P	13(24)	0.54	700	665.8	21.2	5.5	625	700
FZ120N	26(36)	0.72	700	604.8	84.5	5.0	475	700
FZ200Y	13(48)	0.27	1000	734.6	24.4	3.7	690	770
FZ200P	4(36)	0.11	1000	666.3	395.9	3.3	200	1000
FZ200N	0(24)	0.00	1000	—	—	—	—	—
FZ320Y	24(36)	0.67	1000	809.6	67.8	2.5	500	840
FZ320P	1(36)	0.03	1000	1000.0	—	3.1	1000	1000
FZ320N	0(24)	0.00	1000	—	—	—	—	—
M200Y	25(36)	0.69	1000	418.0	239.4	2.1	95	700
M200P	10(36)	0.28	1000	289.5	222.0	1.4	100	650
M200N	34(48)	0.71	1000	541.6	177.0	2.7	190	700

Tabelle E.1: Aus den I(V)-*Biasring* bestimmte Durchbruchsspannungen für unbestrahlte Sensoren bei einer Temperatur von 22 °C. „ N_{Break} “ gibt die Anzahl der Regionen mit einem Durchbruch an. In der Klammer steht die Anzahl der gemessenen Regionen dieses Sensortyps. Die Spalte „Ratio“ ist der Anteil durchgebrochener Regionen. Die Spalte „Test“ ist die maximale Spannung bis zu der gemessen wurde. Die Spalten „Mean“ und „Sigma“ sind der Mittelwert und die Standardabweichung der Durchbruchsspannungen. Die Spalte „Feld“ ist das aus der mittleren Durchbruchsspannung berechnete Durchbruchsfeld. Die Spalten „Min“ und „Max“ sind die minimale bzw. maximale bestimmte Durchbruchsspannung.

FZ120N	FZ200Y	FZ320N	M200N	M200P	M200Y	Summe
6 (36)	1 (48)	1 (24)	7 (36)	9 (36)	14 (48)	38 (480)

Tabelle E.2: Anzahl der abrupten Durchbrüche für den entsprechenden Sensortyp. In den Klammern steht die Gesamtanzahl der Messungen des entsprechenden Sensortyps. Für nicht aufgeführte Sensortypen wurden keine abrupten Durchbrüche gemessen, aber die Messungen in der Summe berücksichtigt. Insgesamt sind 8% aller Regionen abrupt durchgebrochen.

ANHANG E. ZUSÄTZLICHE TABELLEN UND ABBILDUNGEN

Region	FZ200P	FZ200Y	FZ320N	FZ320P	FZ320Y	M200N	M200P	M200Y	Mittelwert
1	59003	51790	394113	298331	241815	17890	485	4237	
2	70501	63951	463971	316993	266151	21450	33538	35497	
3	59407	70562	375701	309498	258631	18434	44450	19444	
4	85801	85265	407214	328301	280447	21888	48318	79120	
5	82169	86606	312606	323725	264558	21388	34521	66557	
6	85527	102999	331469	329115	284513	27103	37219	56724	
7	112309	127845	427508	317992	261629	20835	32249	41701	
8	119061	138918	453127	338174	269958	24433	31155	48238	
9	92057	120933	368930	323387	261019	20614	29105	20464	
10	89061	119206	392096	392263	269423	21122	36703	2421	
11	64107	93545	306200	381496	179118	25386	29859	54046	
12	58777	96317	304045	389428	215279	31425	36815	10811	
Mittelwert	81482	96496	378082	337392	254378	22664	35812	57312	
Ø-PT	78175	91880	364176	325738	244462	20758	34037	40442	
Ø-PS	84788	101109	391987	349046	264295	24570	37291	46078	
PT/PS	0.92	0.91	0.93	0.93	0.92	0.84	0.91	0.95	0.92 ± 0.01
Ø-lang	73735	76862	380846	317661	266019	21359	39609	62813	
Ø-kurz	89229	116127	375318	357123	242738	23969	32648	51812	
lang/kurz	0.83	0.66	1.01	0.89	1.10	0.89	1.21	1.21	0.98 ± 0.07
Ø-80 µm	72645	94867	313580	355941	235867	26326	34603	60612	
Ø-100 µm	81582	98991	385985	338362	267380	20515	39644	60849	
Ø-120 µm	90218	95626	434680	317873	259888	21152	39064	44939	
120/80	1.24	1.01	1.39	0.89	1.10	0.80	1.13	0.74	1.04 ± 0.08
100/80	1.12	1.04	1.23	0.95	1.13	0.78	1.15	1.00	1.05 ± 0.05
Anstieg	$\frac{FZ200P/Y}{M200P/Y} = 2.36$		$\frac{FZ320P/Y}{FZ200P/Y} = 2.08$			$\frac{FZ320P/Y}{M200P/Y} = 4.90$			

Tabelle E.3: Dargestellt ist das Verhältnis des *Biasring*-Stromes nach und vor Bestrahlung bei einer Temperatur von -20°C und einer Feldstärke von $1,25\text{ V}\mu\text{m}^{-1}$.

Die Zeilen „PS“ und „PT“ sind der Mittelwert aller Regionen mit einer *Punch-Through-Struktur* bzw. einem Polysiliziumwiderstand. Die Zeile „PS/PT“ ist der Quotient beider.

Die Zeilen „lang“ und „kurz“ sind der Mittelwert von allen Regionen mit langen bzw. kurzen Pixeln. Die Zeile „PS/PT“ ist der Quotient beider.

Die Zeilen 80, 100 und 120 µm sind der Mittelwert aller Regionen mit dem entsprechenden Pixelraster und die Zeilen „120/80“ und „100/80“ die Quotienten der dazugehörigen Pixelraster.

In der Zeile „Anstieg“ ist das Verhältnis der durchschnittlichen Anstiege aller Regionen der dazugehörenden p-leitenden Sensoren aufgeführt.

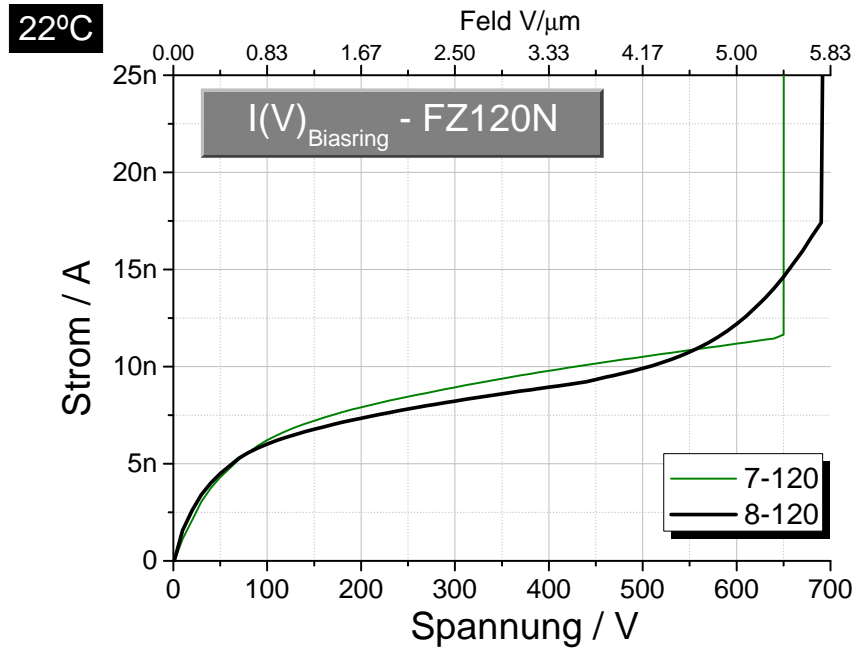


Abbildung E.1: Abhängigkeit des Stromes von der Spannung V_{Bias} für einen der unbestrahlten FZ120N-Sensoren

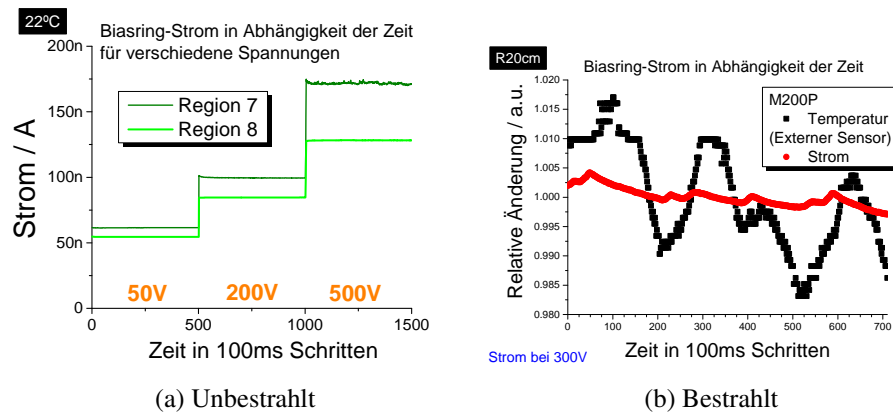


Abbildung E.2: Strom des *Biasrings* bei konstanter Spannung in 100 ms Zeitschritten

(a) Dargestellt 2 Messungen für einen unbestrahlten Sensor bei unterschiedlicher Spannung V_{Bias} (b) Dargestellt ist die 1 cm über dem Sensor gemessene Temperatur und der Strom eines bestrahlten Sensors.

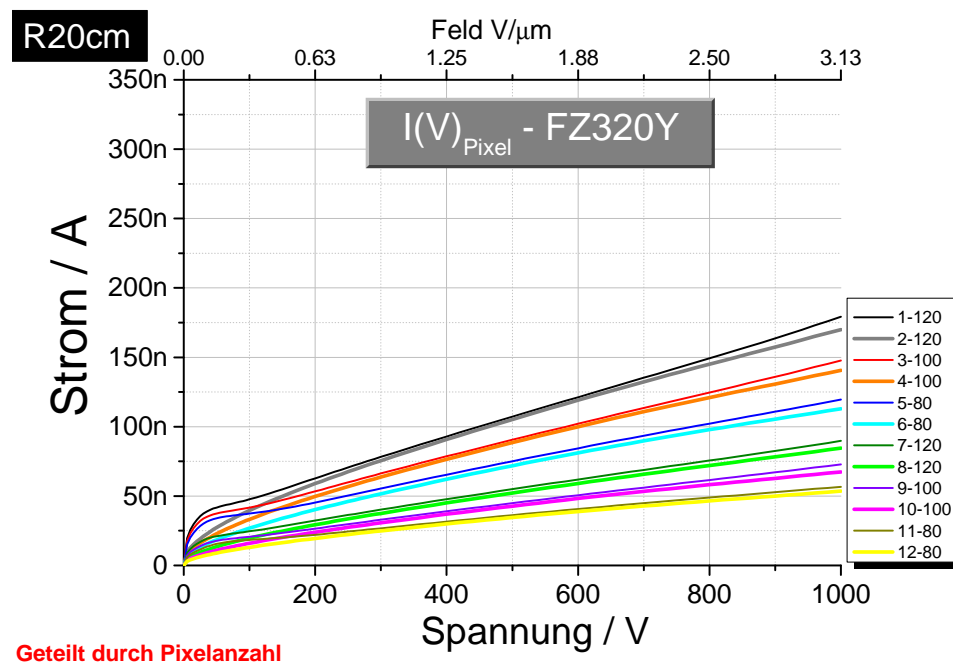


Abbildung E.3: Die Abhängigkeit des Stromes von der Spannung V_{Bias} für den bestrahlten FZ320Y Sensor.

ANHANG E. ZUSÄTZLICHE TABELLEN UND ABBILDUNGEN

	N_{Break}	Ratio	Test [V]	Mean [V]	Sigma [V]	Feld [V μm^{-1}]	Min [V]	Max [V]
E50Y	25(36)	0.69	300	125.8	96.1	1.3	55	270
E50P	26(36)	0.72	300	138.1	64.7	2.8	55	300
E50N	00(36)	0.00	300	—	—	—	—	—
E100Y	21(36)	0.58	500	97.1	77.7	1.0	55	270
E100P	30(42)	0.71	500	200.0	41.6	2.0	140	270
E100N	03(32)	0.09	500	178.3	98.0	1.8	75	270
FZ120Y	19(45)	0.42	700	132.9	142.6	1.1	55	570
FZ120P	10(29)	0.34	700	310.0	275.6	2.6	55	650
FZ120N	15(83)	0.18	700	387.3	278.8	3.2	55	690
FZ200Y	13(104)	0.13	1000	146.9	152.2	0.7	75	620
FZ200P	45(68)	0.66	1000	241.7	148.2	1.2	55	600
FZ200N	17(65)	0.26	1000	320.0	235.8	1.6	65	630
FZ320Y	22(99)	0.22	1000	381.1	365.6	1.2	55	980
FZ320P	34(48)	0.71	1000	182.8	139.2	0.6	55	550
FZ320N	13(64)	0.20	1000	300.4	215.0	0.9	85	600
M200Y	19(29)	0.66	1000	113.4	79.3	0.6	55	270
M200P	36(83)	0.43	1000	260.5	119.7	1.3	60	475
M200N	03(102)	0.03	1000	166.7	180.6	0.8	55	375

Tabelle E.4: Aus den Strom-Spannungsmessungen der Pixel bestimmte Durchbruchsspannungen. „ N_{Break} “ gibt die Anzahl der Regionen mit einem Durchbruch an. In der Klammer steht die Anzahl der gemessenen Regionen dieses Sensortyps. Die Spalte „Ratio“ ist der Anteil durchgebrochener Regionen. Die Spalte „Test“ ist die maximale Spannung bis zu der gemessen wurde. Die Spalten „Mean“ und „Sigma“ sind der Mittelwert und die Standardabweichung der Durchbruchsspannungen. Die Spalte „Feld“ ist das durchschnittliche Durchbruchsfeld. Die Spalten „Min“ und „Max“ sind die minimale bzw maximale gemessene Durchbruchsspannung.

ANHANG E. ZUSÄTZLICHE TABELLEN UND ABBILDUNGEN

	FZ200P	FZ200Y	FZ320N	FZ320P	FZ320Y	M200N	M200P	M200Y	Mittelwert
1	132941	48308	821693	622222	343794	33048	87193	—	
2	61230	76941	238668	417158	267528	88334	75387	64483	
3	45903	90760	339705	941166	262920	9398	42236	6033	
4	124367	—	481853	878714	205644	68436	82217	—	
5	—	122463	—	264645	209846	46886	92953	5263	
6	55208	133538	256760	1188652	205019	1049534	66063	221621	
7	56463	275086	226442	565057	228991	—	107907	11218	
8	208613	70575	278592	304140	188785	39333	56483	61484	
9	125268	101013	169760	340324	173913	39793	28041	2673	
10	124520	28048	214603	1068189	146617	39100	61953	128593	
11	41563	52156	139552	209133	226083	57860	78162	2630	
12	51210	94239	33021	1332274	155609	52391	75372	72304	
Mittelwert	93390	99375	290968	677639	217896	47458	71164	48025	
Ø-PT	80428	114964	339431	490424	240925	37397	72749	5563	172735
Ø-PS	104191	80668	250583	864854	194867	222854	69579	109697	237162
PT/PS	0.77	1.43	1.35	0.57	1.24	0.17	1.05	0.05	0.83 ± 0.22
Ø-lang	83930	94402	427736	718759	249125	215939	74341	74350	242323
Ø-kurz	101273	103519	176995	636519	186666	45695	67986	46483	170642
lang/kurz	0.83	0.91	2.42	1.13	1.33	4.73	1.09	1.60	1.75 ± 0.53
Ø-80 µm	49327	100599	143111	748676	199139	301667	78137	75454	212014
Ø-100 µm	105014	73274	301480	807098	197273	39182	53612	45766	202837
Ø-120 µm	114812	117727	391349	477144	257275	53572	81743	45728	192419
120/80	2.33	1.17	2.73	0.64	1.29	0.18	1.05	0.61	1.25 ± 0.36
100/80	2.13	0.73	2.11	1.08	0.99	0.13	0.69	0.61	1.06 ± 0.29

Tabelle E.5: Anstieg des Pixeldunkelstromes durch Bestrahlung. Dargestellt ist das Verhältnis des Stromes bei einer Feldstärke von $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ vor und nach Bestrahlung bei einer Temperatur von -20°C für alle Sensorregionen. Die Zeile „Mittelwert“ ist die durchschnittliche Steigerungsrate.

Die Zeilen „PS“ und „PT“ sind der Mittelwert von allen Regionen mit einer *Punch-Through-Struktur* bzw. einem Polysiliziumwiderstand. Die Zeile „PS/PT“ ist der Quotient beider.

In den Zeilen „lang“ und „kurz“ sind die mittleren Steigerungsraten für Regionen mit kurzen bzw. langen Pixeln bzw in der Zeile „lang/kurz“ das Verhältnis beider.

In den Zeilen „80 µm“, „100 µm“, „120 µm“ sind die mittleren Steigerungsraten für Regionen mit dem entsprechenden Pixelraster. In den letzten beiden Zeilen ist das Verhältnis der entsprechenden Pixelsraster aufgeführt.

ANHANG E. ZUSÄTZLICHE TABELLEN UND ABBILDUNGEN

	M200Y	FZ320P	FZ320Y	FZ200Y	M200P	M200N	FZ200P	FZ320N	Mittelwert	Sigma
1	256	334	347	205	245	170	189	—	249	69
2	288	333	371	257	146	431	205	—	290	98
3	266	176	263	208	259	263	278	309	253	42
4	411	189	277	—	291	149	141	349	258	103
5	250	183	262	246	251	229	—	—	237	28
6	195	219	283	244	277	14	306	358	237	103
7	515	578	502	404	—	758	318	—	513	151
8	572	516	544	545	577	668	592	724	592	70
9	530	521	532	545	538	536	544	618	545	30
10	611	649	582	556	609	768	620	1015	676	151
11	546	627	419	482	542	547	603	642	551	75
12	617	727	496	534	633	—	637	771	631	97

Tabelle E.6: Verhältnis des *Biasring*- und des Pixelstromes für bestrahlte Sensoren bei einem Feld von $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ und einer Temperatur von -20°C . Sigma ist die Standardabweichung des Mittelwertes.

	Pixel	<i>Biasring</i>	Abweichung [%]	Theoretisch
E50N	32	72	-55.5	10.9
E50P	35	56	-37.2	10.9
E50Y	77	96	-19.5	10.9
E100N	51	73	-30.0	31.3
E100P	98	114	-14.0	31.3
E100Y	99	140	-29.0	31.3
FZ120N	104	136	-23.6	42.2
FZ120P	107	161	-33.3	42.2
FZ120Y	49	137	-63.8	42.2
FZ200N	152	145	4.8	100.7
FZ200P	121	133	-9.5	100.7
FZ200Y	133	166	-20.0	100.7
M200N	214	245	-12.8	100.7
M200P	152	172	-11.7	100.7
M200Y	229	274	-16.4	100.7
FZ320N	159	207	-23.5	234.0
FZ320P	115	153	-25.3	234.0
FZ320Y	124	144	-14.2	234.0
Mittelwert			$-24,1 \pm 3.84$	

Tabelle E.7: Aufgeführt sind die, aus den Kapazitätsmessungen der Pixel und des *Biasrings* berechneten Verarmungsspannungen und die prozentuale Abweichung. Die theoretischen Werte sind mit der Formel 2.32 berechnet.

ANHANG E. ZUSÄTZLICHE TABELLEN UND ABBILDUNGEN

	FZ320N			FZ320P			FZ320Y		
	BR	Pixel	Verhältnis	BR	Pixel	Verhältnis	BR	Pixel	Verhältnis
1	1.01	0.52	1.94	0.80	0.54	1.49	0.98	0.94	1.05
2	1.01	0.49	2.04	0.92	0.73	1.26	0.99	0.62	1.60
3	1.00	0.46	2.18	0.80	—	—	1.04	1.18	0.88
4	0.93	0.34	2.76	0.85	0.48	1.78	0.97	0.63	1.52
5	0.99	—	—	0.81	0.48	1.66	1.04	0.55	1.87
6	0.88	0.48	1.81	0.87	0.71	1.23	0.96	0.62	1.55
7	0.97	—	—	0.78	0.30	2.61	1.03	0.42	2.44
8	1.22	0.28	4.40	0.78	0.28	2.76	0.99	0.45	2.17
9	0.96	0.37	2.58	0.72	0.57	1.25	1.04	0.32	3.24
10	1.15	0.23	4.95	0.80	0.39	2.04	0.99	0.45	2.20
11	0.96	0.45	2.13	0.66	0.58	1.14	1.03	0.34	3.07
12	1.13	0.31	3.59	0.70	0.21	3.29	0.99	0.43	2.28
Mittelwert	2.84 ± 0.35			1.87 ± 0.22			1.99 ± 0.21		

Tabelle E.8: **Änderung der Pixelkapazität durch Bestrahlung.** Abgebildet sind die Verhältnisse der Kapazitäten bei einem Verarmungsfeld von $1,25 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ nach und vor Bestrahlung für den *Biasring* (BR) und die Pixel. Die Spalte „Verhältnis“ gibt den Quotienten beider Verhältnisse an.

Region	FZ200P	FZ200Y	FZ320N	FZ320P	FZ320Y	M200N	M200P	M200Y	Mittelwert
1	2245	907	2487	14045	1657	1150	308	85	
2	53	741	813	6603	292	20833	567	244	
3	174	3022	610	8308	396	3482	239	1773	
4	5002	329489	2721	664	5137	—	975	2526	
5	326005	1802	31206	4568	7100	—	252	6283	
6	438	167	536	1054	899	—	402	322	
7	994	246	—	—	1074	2442	782	—	
8	115	59	86	—	86	145	217	262	
9	1722	1665	—	5600	4761	1247	607	871	
10	337	89	193	388	116	481	580	148	
11	1140	2390	—	5204	3442	764	2018	2554	
12	—	62	2	158	696	1563	641	452	
Mittelwert	1222	1014	1064	4659	2138	1409	632	1411	1694 ± 450
Ø-PT	1255	1672	1548	7545	3072	1817	701	2313	2490
Ø-PS	1189	224	870	1774	1204	730	564	659	902
PT/PS	1.06	7.47	1.78	4.25	2.55	2.49	1.24	3.51	3.04 ± 0.74
Ø-lang	1583	1328	1433	5874	2580	2316	457	1872	2180
Ø-kurz	718	752	139	1892	1696	1107	808	715	978
lang/kurz	2.20	1.77	10.29	3.11	1.52	2.09	0.57	2.62	3.02 ± 1.07
Ø-80 µm	789	1105	536	2746	3034	1164	828	2403	1576
Ø-100 µm	1809	1592	1175	3740	2603	1737	600	1329	1823
Ø-120 µm	852	488	1128	10324	777	1246	469	197	1935
120/80	1.08	0.44	2.11	3.76	0.26	1.07	0.57	0.08	1.17 ± 0.43
120/100	0.47	0.31	0.96	2.76	0.30	0.72	0.78	0.15	0.81 ± 0.30

Tabelle E.9: Dargestellt sind die Verhältnisse des Zwischenpixelwiderstandes vor und nach Bestrahlung. Die unteren Zeilen sind die durchschnittliche Änderung für alle Regionen mit kurzen und langen Pixeln, für Regionen mit einem Polysiliziumwiderstand bzw. einer *Punch-Through-Struktur* und für Regionen mit einem Raster von 80, 100 und 120 µm und die entsprechenden Quotienten.

CMS/Geo		CMS/Geo		CMS/Geo		CMS/Geo		CMS/Geo			
E100-PT	0.91	E50-PT	1.10	FZ120-PT	0.99	FZ200-PT	0.94	FZ320-PT	0.94	M200-PT	0.94
E100-PS	0.93	E50-PS	1.10	FZ120-PS	0.99	FZ200-PS	0.99	FZ320-PS	0.95	M200-PS	0.85
E100N-PT	0.95	E50N-PT	0.99	FZ120N-PT	0.96	FZ200N-PT	0.95	FZ320N-PT	0.95	M200N-PT	0.91
E100N-PS	0.95	E50N-PS	1.01	FZ120N-PS	0.96	FZ200N-PS	0.97	FZ320N-PS	0.94	M200N-PS	0.88
E100N	0.95	E50N	1.00	FZ120N	0.96	FZ200N	0.96	FZ320N	0.94	M200N	0.90
E100P-PT	0.81	E50P-PT	1.19	FZ120P-PT	1.06	FZ200P-PT	1.00	FZ320P-PT	0.95	M200P-PT	1.01
E100P-PS	0.85	E50P-PS	1.19	FZ120P-PS	1.07	FZ200P-PS	1.02	FZ320P-PS	0.96	M200P-PS	0.87
E100P	0.83	E50P	1.19	FZ120P	1.06	FZ200P	1.01	FZ320P	0.96	M200P	0.95
E100Y-PT	0.95	E50Y-PT	1.25	FZ120Y-PT	0.95	FZ200Y-PT	0.87	FZ320Y-PT	0.91	M200Y-PT	0.87
E100Y-PS	0.96	E50Y-PS	1.17	FZ120Y-PS	0.97	FZ200Y-PS	0.97	FZ320Y-PS	0.95	M200Y-PS	0.82
E100Y	0.95	E50Y	1.21	FZ120Y	0.96	FZ200Y	0.91	FZ320Y	0.93	M200Y	0.85

Tabelle E.10: Vergleich der Normierungsmethoden CintCMS und CintGeo. Dargestellt ist das Verhältnis der beiden Normierungsergebnisse

Anhang F

Sonstige Anhänge

F.1 Danksagungen

Zu erst möchte ich meiner Arbeitsgruppe Dank für die geleistete Hilfestellung und das freundliche Arbeitsklima aussprechen. Allen voran meinen beiden Betreuern Wolfgang Lohmann und Wolfgang Lange die sehr viel für mich möglich gemacht haben und ohne die diese Arbeit nicht entstanden wäre. Besonders bedanken möchte ich mich auch bei den vielen Praktikanten die einen Teil der gezeigten Messungen vorgenommen haben. Namentlich sind dieses Sandro Kollowa, Oliver Reetz, Martin Stegler und Tomasz Wojton. Auch möchte ich mich bei Hans Hentschel für die Planung der Probestation und Sergej Schuwalow für die vielen Anregungen und Diskussionen bedanken.

Desweiteren möchte ich mich bei Olga bedanken, die stets die gute Seele unseres Büros war und Ringo, unserem Computerexperten. Besonderen Dank auch an Maria für die vielen interessanten Gespräche und auch danke Olena, die durch ihren besonderen Charme immer eine starke Motivationshilfe für mich war.

Nicht vergessen möchte ich auch Wolfgang Friebe und Lukas Thiemeier mit denen ich sehr fruchtbare Diskussionen über die Datenbankgestaltung geführt habe und die mir wesentlich bei der Umsetzung geholfen haben.

Einen besonderen Dank möchte ich auch Vanessa aussprechen, die mich sehr unterstützt hat und stets sehr verständnisvoll sein musste.

Ganz zum Schluss noch ein freundschaftlicher Gruß an Ernst und Stefan, die mir in einer schwierigen Phase zur Seite standen. Lasst euch umarmen Jungs.

F.2 Kurzlebenslauf

Persönliche Angaben

Name	Matthias Bergholz
Anschrift	Florian-Geyer-Str. 104 12489 Berlin-Adlershof
Telefon	0172 / 209 45 26
E-Mail	matthias.bergholz@gmx.de
Geburtsdatum /-ort	17.08.1981 Cottbus
Familienstand	Ledig



Schulbildung

07/1988 - 06/1994	Carl-Blechen-Grundschule, Cottbus
07/1994 - 06/2001	Max-Steenbeck-Gymnasium, Cottbus

Wehrdienst

07/2001 - 03/2002	Grundwehrdienst beim Panzergrenadierbataillon 411
-------------------	---

Hochschule

10/2002 - 11/2006	Bachelor-Studium an der BTU Cottbus „Physik der Halbleitertechnologie“
12/2006 - 03/2008	Master-Studium an der BTU Cottbus „Physik der Halbleitertechnologie“
01/2009 -	Promotionsstudium an der BTU Cottbus Fachbereich: Sensorentwicklung

Berufstätigkeit

04/2006 - 03/2008	Studentische Hilfskraft am Lehrstuhl Angewandte Physik II der BTU Cottbus
02/2007 - 07/2007	Angestellter im sonstigen Innendienst beim Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY
04/2008 - 09/2008	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Angewandte Physik II der BTU Cottbus
10/2008 - 12/2008	Arbeitssuchend
01/2009 -	Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der CMS-Gruppe am DESY Zeuthen

Berlin, der 04.07.2014

F.3 Liste ausgewählter Veröffentlichungen

F.3.1 Schriftliche Veröffentlichungen

¹

1. **„Radiation Hard Sensor Materials for the CMS Tracker Upgrade“**
Matthias Bergholz
CMS CR-2011/308
2. **„Forward instrumentation for ILC detectors“**
W. Lohmann et al.
JINST 5 P12002, 2010, doi:10.1088/1748-0221/5/12/P12002
3. **„The band gap and band offset in ultrathin oxide-semiconductor hetero-structures“**
D. Schmeißer, K. Henkel, M. Bergholz, M. Tallarida
Superlattices and Microstructures 47 (2010) 369-376
4. **„Al-Oxynitride as a buffer layer for high-k dielectrics“**
K. Henkel, Y. Burkov, M. Bergholz, K. Karavaev, R. Sohal, M. Torche, D. Schmeißer
Proceedings of 15th Workshop on Dielectrics in Microelectronics (Berlin 2008) 161-162
5. **„In-Situ Untersuchungen für das Wachstum von Praseodymoxid auf Silizium-oxid- und Aluminiumoxynitridsubstraten“**
Matthias Bergholz
Masterarbeit an der BTU Cottbus (2008), LS Angewandte Physik/Sensorik
6. **„Grundlagen der Electron Energy Loss Spectroscopy (EELS)“**
Matthias Bergholz
Bachelorarbeit an der BTU Cottbus (2006), LS Angewandte Physik/Sensorik

¹ Auswahl, Stand Dezember 2013

F.3.2 Konferenzbeiträge

1. „Untersuchung von strahlenharten Multi-geometry Pixelsensoren für den zukünftigen CMS Spurdetektor im Rahmen der HPK-Kampagne“
M. Bergholz, W. Lange und W. Lohmann
76. Jahrestagung der DPG (Göttingen 2012), T63.10
2. **„Radiation Hard Sensor Materials for the CMS Tracker Upgrade“**
M. Bergholz (On behalf of the CMS Tracker Collaboration)
IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (Valencia 2011), N7-3
3. „Streifen-Sensorsimulationen für das Upgrade des CMS Spurdetektors“
Matthias Bergholz
75. Jahrestagung der DPG(Karlsruhe 2011), T63.3
4. „Sensorsimulationen für zukünftige Siliciumdetektoren“
Matthias Bergholz
74. Jahrestagung der DPG (Bonn 2010), T60.6
5. „I/V and C/V Measurements of Hamamatsu Si-Detectors“
Matthias Bergholz
FCAL Collaboration Meeting 2009, Talk 14
6. „Strixel Sensor Design for Large Radii of a New CMS Tracker for SLHC“
Collaboration board paper poster presented on behalf of CINCO
IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (Orlando 2009), N7-3
7. „Band gap determination of thin Praseodymiumoxide layers on Aluminium-oxynitride films“
M. Bergholz and D. Schmeißer
72. Jahrestagung der DPG und DPG Frühjahrstagung (Berlin 2008), DS 23.4
8. „EELS to determine the band gap of thin dielectric layers“
M. Bergholz, R. Sohal, D. Schmeißer
Verhandlungen der DPG (VI) 41, 1/2006 (2006) 156, ISSN 0420-0195

F.4 Eidesstattliche Erklärung

Cottbus, der 21.12.2015

Hiermit erkläre ich, Matthias Bergholz, als Verfasser dieser Arbeit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen (einschließlich elektronischer Quellen) direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind ausnahmslos als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer anderen Prüfung noch nicht vorgelegt worden.



Matthias Bergholz